



# 《物理学》习题解答

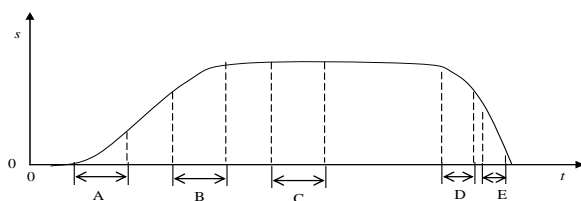
成都信息工程大学

二〇二〇年八月

# 第一章 质点运动

## 一、分析题

1. 一辆车沿直线行驶，习题图 1-1 给出了汽车车程随时间的变化，请问在图中标出的哪个阶段，汽车具有的速度最大。

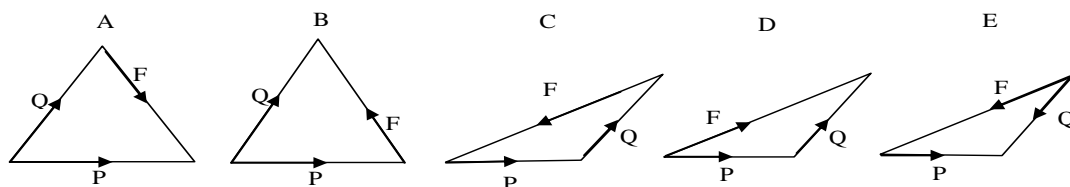


习题图 1-1

答: E

位移-速度曲线斜率为速率，E 阶段斜率最大，速度最大。

2. 有力  $\vec{P}$  与  $\vec{Q}$  同时作用于一个物体，由于摩擦力  $\vec{F}$  的存在而使物体处于平衡状态，请分析习题图 1-2 中哪个可以正确表示这三个力之间的关系。

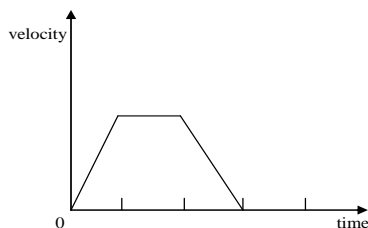


习题图 1-2

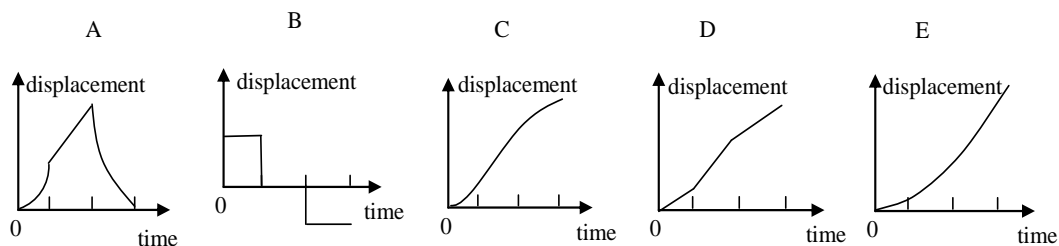
答: C

三个力合力为零时，物体才可能处于平衡状态，只有 C 满足条件。

3. 习题图 1-3 (a) 为一个物体运动的速度与时间的关系，请问习题图 1-3 (b) 中哪个图可以正确反映物体的位移与时间的关系。



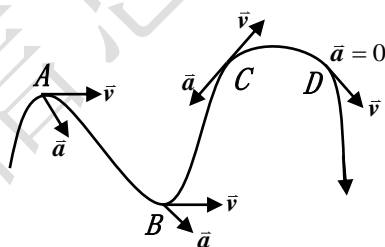
习题图 1-3 (a)



答：C

由  $v-t$  图可知，速度先增加，然后保持不变，再减少，但速度始终为正，位移一直在增加，且三段变化中位移增加快慢不同，根据  $v-t$  图推知  $s-t$  图为 C。

4. 质点沿曲线运动，质点在 A、B、C 和 D 点的速度  $\vec{v}$  和加速度  $\vec{a}$  如习题图 1-4 所示，请问质点各点的运动情况是否正确？

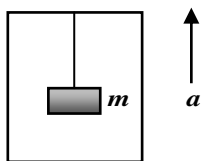


习题图 1-4

答：A 正确，B、C、D 错误

质点作曲线运动，各点速度  $\vec{v}$  为过该点的切线，指向运动方向，所以各点速度  $\vec{v}$  表示均正确。加速度  $\vec{a}$  应指向曲线凹侧，A 点加速度表示正确，B 和 C 点加速度表示错误，D 点加速度不为 0。

5. 如习题图 1-5 所示，升降机天花板一轻绳系有一物体  $m$ ，当升降机以加速度  $a$  上升时，绳的张力正好等于绳子所能承受的最大张力的一半。请分析：若要使绳子刚好被拉断，升降机上升的加速度应该是多少？



习题图 1-5

答：  $2a + g$

以重物为研究对象。在地面参考系中以竖直向上为正方向。设绳所能承受的最大张力为  $T_m$ ，绳刚好被拉断时升降机的加速度为  $a_1$ 。由牛顿第二定律列方程：

$$\begin{aligned} \frac{T_m}{2} - mg &= ma \\ T_m - mg &= ma_1 \end{aligned}$$

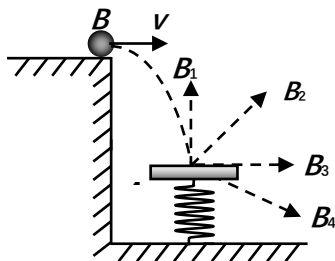
解得：  $a_1 = 2a + g$

6. 若在一静止物体上施加一个较小的作用力，那么物体运动的速度也一定较小吗？这个较小的力能使物体产生较大的加速度吗？请说明原因。

答：不一定；有可能

根据动量定理，即使作用力较小，只要作用时间长，原本静止的物体就可获得较大的动量，即较大的速度。根据牛顿第二定律，无论多么小的力都可以使物体产生加速度。

7. 质量为  $m$  的平板  $A$ ，由竖立弹簧支持处在水平位置，如习题图 1-6。如果从上部平台上，以初速为  $v$  沿水平方，投掷一个质量为  $m$  的小球  $B$ ，球  $B$  与平板发生完全弹性碰撞，平板是完全光滑的。请问球  $B$  与平板  $A$  碰撞后，将沿哪个方向运动（在  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  中选择）。



习题图 1-6

答:  $B_3$

小球  $B$  和板  $A$  弹性碰撞过程中, 水平方向不受外力, 水平动量不变。在碰撞瞬间, 竖直方向可忽略重力影响, 竖直动量不变。又因  $m_A = m_B$ , 碰后二者交换速度, 所以碰后  $B$  球速度竖直分量为零。由以上分析, 碰后小球  $B$  沿水平方向  $B_3$  运动。

8. 请分析下列对功的描述哪些是正确的: (A) 保守力作正功时, 系统内相应的势能增加; (B) 质点运动经一闭合路径, 保守力对质点作的功为零; (C) 作用力和反作用力大小相等、方向相反, 所以两者作功的代数和必为零。

答: B

保守力作功与路径无关, 因此质点运动经一闭合路径, 保守力对质点作的功为零。

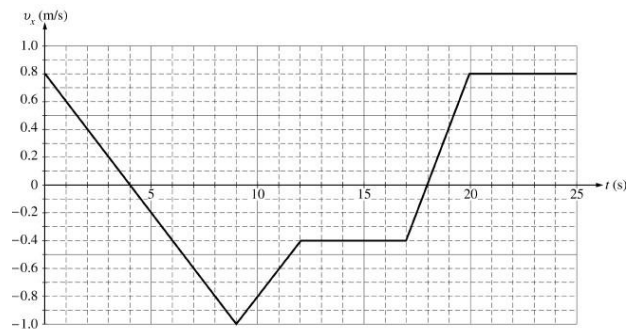
9. 两个质量相同的物体从同一高度自由下落, 与水平地面碰撞后, 一个被反弹回去, 另一个却停留在地面上。请问哪一个物体给地面的冲量更大?

答: 被反弹回去的物体给地面的冲量更大

两个质量相同的物体从同一高度自由下落, 和地面相接触的瞬间动量一样, 设其为  $\vec{p}_1 = -p_1 \vec{j}$ 。反弹回去物体具有反弹动量  $\vec{p}_2 = -p_2 \vec{j}$ , 而另一个反弹动量为零。动量的增量就是所受的冲量, 反弹物体受到的冲量  $\vec{I}_1 = (p_1 + p_2) \vec{j}$ , 贴在地上物体受到的冲量  $\vec{I}_2 = p_1 \vec{j}$ 。因为  $\vec{I}_1 > \vec{I}_2$ , 所以反弹回去物体受到的冲量大, 也就是它给地面的冲量大。

### 三、综合题

1. 质量为  $0.50\text{kg}$  的物体在水平桌面上做直线运动, 其速率随时间的变化如习题图 1-4 所示。问: (1) 设  $t = 0\text{s}$  时, 物体在  $x = 2.0\text{cm}$  处, 那么  $t = 9\text{s}$  时物体在  $x$  方向的位移是多少? (2) 在某一时刻, 物体刚好运动到桌子边缘, 试分析物体之后的运动情况。



解：（1）由  $v-t$  可知，0~9 秒内物体作匀减速直线运动，且加速度为：

$$a = \frac{0.8}{4} \text{ cm/s}^2 = 0.2 \text{ cm/s}^2$$

由图可得：  $s_0 = 2.0 \text{ cm}$ ，  $v_0 = 0.8 \text{ cm/s}$ ，  $v_t = -1.0 \text{ cm/s}$ ，则由匀减速直线运动的位移与速度关系可得：

$$2a(s - s_0) = v_t^2 - v_0^2$$

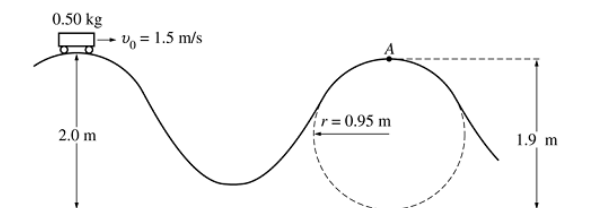
$$s = (v_t^2 - v_0^2) / 2a + s_0$$

$$= [0.8^2 - (-1.0)^2] / 2 \times 0.2 + 2.0 \text{ cm}$$

$$= 1.1 \text{ cm}$$

（2）当物体运动到桌子边缘后，物体将以一定的初速度作平抛运动。

2. 设计师正在设计一种新型的过山车，习题图 1- 5 为过山车的模型，车的质量为  $0.50 \text{ kg}$ ，它将沿着图示轨迹运动，忽略过山车与轨道之间的摩擦力。图中 A 点是一个坡道的最高点，离地高度为  $1.9 \text{ m}$ ，该坡道的上半部分为一半径为  $0.95 \text{ m}$  的半圆。若车从离地  $2.0 \text{ m}$  的轨道最高点除出发，初始速度为  $v_0 = 1.5 \text{ m/s}$ ，（1）试求过山车到达 A 点的速度；（2）计算在 A 点时，轨道对过山车的作用力；（3）如果要使车停在 A 点，就必须对车施加某种摩擦力，试求摩擦力应该做多少功，才能使车静止在 A 点；（4）假设要让过山车间在 A 点沿轨道下降之前，刚好能实现与轨道之间没有力的作用，请设想该如何对轨道的设计进行修改，并加以证明。



解：（1）在过山车运动过程中机械能守恒，过山车离地最高点的机械能与 A 点机械能相等，则

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}mv_0^2 + mgH_0 &= \frac{1}{2}mv_A^2 + mgH \\ v_A &= \sqrt{2g(H_0 - H) + v_0^2} \\ &= \sqrt{2 \times 10 \times (2.0 - 0.95 \times 2) + 1.5^2} \text{ m/s} \\ &= 2.06 \text{ m/s}\end{aligned}$$

（2）由牛顿第二定律得：

$$\begin{aligned}mg - N &= m \frac{v_A^2}{r} \\ N &= mg - m \frac{v_A^2}{r} \\ &= 0.50 \times 10 - 0.50 \times \frac{2.06^2}{0.95} \text{ N} \\ &= 2.76 \text{ N}\end{aligned}$$

（3）若要使车停在 A 点，则摩擦力作的功应正好等于车在无摩擦力条件下 A 点的动能，则

$$\begin{aligned}W_f &= \frac{1}{2}mv_A^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 0.50 \times 2.06^2 \text{ J} \\ &= 1.06 \text{ J}\end{aligned}$$

（4）若要使车在 A 点时  $N=0$ ，由牛顿第二定律得：

$$mg = m \frac{v_A'^2}{r_A} \quad (1)$$

由机械能守恒定律得：

$$\frac{1}{2}mv_0^2 + mgH = \frac{1}{2}mv_A'^2 + 2mgr_A \quad (2)$$

联立①②两式可得：

$$\begin{aligned} r_A &= \frac{v_0^2 + 2gH_0}{5g} \\ &= \frac{1.5^2 + 2 \times 10 \times 2}{5 \times 10} \text{m} \\ &= 0.85\text{m} \end{aligned}$$

可见，如果把 A 点轨道半径减少为 0.85m，过山车在 A 点与轨道之间没有力的作用。还有一种办法是调整起始最高点与离地高度，同理，可将最高点离地高度升高为 2.38m。

3. 一个电子在电场中运动，其运动方程为  $x = 2t$ ， $y = 19 - 2t^2$ ，试求：（1）电子的运动轨迹；（2）电子运动的速度和加速度；（3）在什么时刻电子位矢  $\vec{r}$  与速度  $\vec{v}$  恰好垂直？此时位矢  $\vec{r}$  与速度  $\vec{v}$  的分别是多少？

解：（1）由运动方程消去  $t$ ，得轨迹方程：

$$y = 19 - \frac{x^2}{2}$$

轨迹曲线为抛物线。

（2）用位矢、速度、角速度分别为：

$$\vec{r} = 2t\vec{i} + (19 - 2t^2)\vec{j}$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = 2\vec{i} - 4t\vec{j} (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = -4\vec{j} (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

（3）位矢  $\vec{r}$  与速度  $\vec{v}$  垂直时， $\vec{r} \cdot \vec{v} = 0$ ，即

$$\begin{aligned} [2t\vec{i} + (19 - 2t^2)\vec{j}] \cdot (2\vec{i} - 4t\vec{j}) &= 0 \\ 4t - 4t(19 - 2t^2) &= 0 \end{aligned}$$

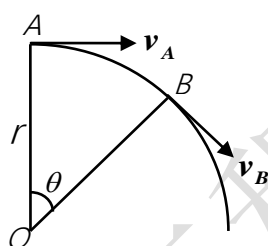


解得  $t = 0$  或  $t = 3(\text{s})$ 。

$t = 0$  时:  $x = 0, y = 19(\text{m}); v_x = 2(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}), v_y = 0, \mathbf{v} = 2\mathbf{i} (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$

$t = 3\text{s}$  时:  $x = 6(\text{m}), y = 1(\text{m}); v_x = 2(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}), v_y = -12(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}), \mathbf{v} = 2\mathbf{i} - 12\mathbf{j} (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$

4. 如习题图 1-9 所示, 超音速歼击机在高空点  $A$ , 以  $1940 \text{ km/h}$  的水平速度, 沿圆弧开始俯冲, 经过  $3\text{s}$  后到  $B$  点, 其速率为  $2192 \text{ km/h}$ 。设圆弧半径  $r = 3.5 \text{ km}$ , 飞机从  $A$  到  $B$  过程视为匀变速率圆周运动, 不计重力加速度的影响。试求: (1) 飞机在  $B$  点的加速度; (2) 飞机由点  $A$  到点  $B$  所经历的路程。



习题图 1-9

解: (1)  $v_A = 1940 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$   $v_B = 2192 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $t = 3\text{s}$ ,  $r = 3.5 \times 10^3 \text{ m}$

$$\int_{v_A}^{v_B} dv = a_t \int_0^t dt \Rightarrow a_t = \frac{v_B - v_A}{t}$$

$$\text{而 } B \text{ 点 } a_n = \frac{v_B^2}{r}$$

解得:  $a_t = 23.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $a_n = 106 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

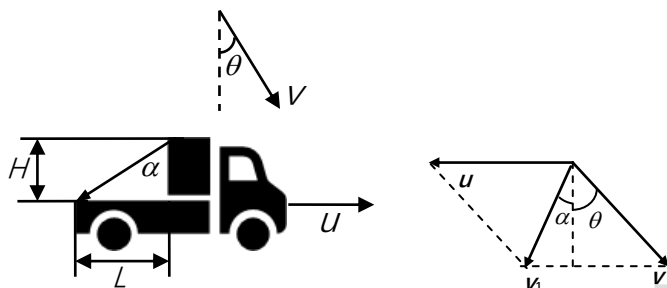
大小:  $a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = 109 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

方向:  $\beta = \arctan \frac{a_t}{a_n} = 12.4^\circ$

(2) 矢径  $\vec{r}$  所转过的角度  $\theta = \omega_A t + \frac{1}{2} \alpha t^2$

飞机由点  $A$  到点  $B$  所经历的路程  $s = r\theta = v_A t + \frac{1}{2} a t^2 = 722 \text{ m}$

5. 如习题图 1-10 所示，一辆汽车在雨中行驶，雨滴以  $v$  速度下落，与竖直方向的夹角为  $\theta$ 。若车厢有高为  $H$  的篷子，但后部任有长为  $L$  的敞篷车厢，请问：若要使无篷区车厢不被淋湿，汽车速度  $u$  应为多少？



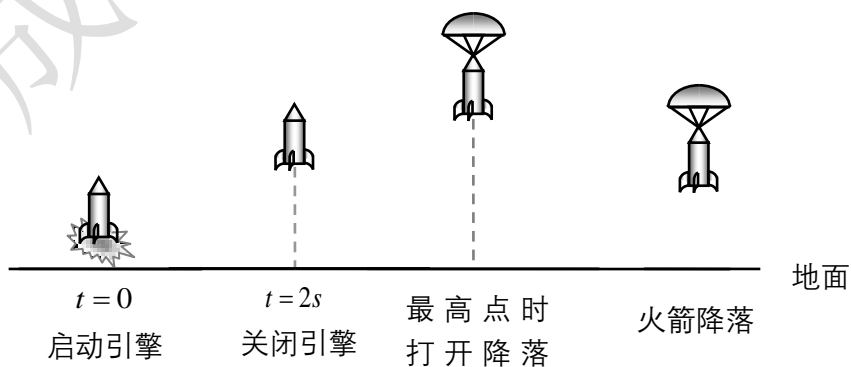
习题图 1-10

解：利用相对速度法求解，雨滴相对车的速度  $v_1$  如图，

则有：  $u = v \cdot \sin \theta + v \cdot \cos \theta \cdot \tan \alpha$ ，而  $\tan \alpha = \frac{L}{H}$

$u = v \cdot \sin \theta + \frac{L}{H} v \cdot \cos \theta = v(\sin \theta + \frac{L}{H} \cos \theta)$  即：汽车须以大于  $v(\sin \theta + \frac{L}{H} \cos \theta)$  的速度行驶。

6. 如习题图 1- 11 所示，火箭模型的质量为  $0.25\text{kg}$ ， $t = 0$  时刻，发射引擎推动力  $F = 20.0\text{N}$ ，并持续作用  $2\text{s}$ ，然后引擎停止工作，火箭继续上升，当火箭上升到一定高度后，开始竖直下落。请问：（1）在前  $2\text{s}$  的运行过程中，火箭的平均加速度是多少？（2）火箭到达的最大高度是多少？（3）火箭到达最大高度的时间是多少？



习题图 1-11

解：（1）由动量定理得：

$$(F - mg)t = mv$$

$$v = \frac{F - mg}{m} t$$

$$= \frac{20 - 0.250 \times 10}{0.250} \times 2 \text{ m/s}$$

$$= 140 \text{ m/s}$$

则平均加速度为:

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{140 - 0}{2} \text{ m/s}^2 = 70 \text{ m/s}^2$$

(2) 在前 2s 时间内, 火箭近似作匀加速直线运动, 则

$$2aH = v_t^2 - v_0^2 = v_t^2$$

$$H = \frac{v_t^2}{2a} = \frac{140^2}{2 \times 70} \text{ m} = 140 \text{ m}$$

在 2s 以后, 火箭在重力作用下做匀减速直线运动, 直到速度减为 0, 则

$$-2gH' = v_t^2 - v_0^2$$

$$H' = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{140^2}{2 \times 10} \text{ m} = 980 \text{ m}$$

则火箭上升的最大高度为:

$$H_{\max} = H + H'$$

$$= 140 + 980 \text{ m} = 1120 \text{ m}$$

(3) 火箭在重力作用下, 速度减为 0 的时间为:

$$-gt = v_t - v_0$$

$$t = \frac{v_0}{g} = \frac{140}{10} \text{ s} = 14 \text{ s}$$

则火箭到达最大高度的时间为:

$$T = 14 \text{ s} + 2 \text{ s} = 16 \text{ s}$$

7. 一颗子弹在枪筒里前进时所受的合力大小为  $F = 400 - \frac{4 \times 10^5}{3}t$  (SI), 从

枪口射出时子弹速率为 300 m/s。假设子弹离开枪口时, 受到合力刚好为零, 试求: (1) 子弹走完枪筒所用的时间; (2) 子弹在枪筒中所受的冲量; (3) 子弹的质量是多少?

解: (1) 由子弹离开枪口时所受合力为零, 即

$$F = 400 - \frac{4 \times 10^5}{3}t = 0$$

得子弹在枪筒中运动时间为

$$t = \frac{3 \times 400}{4 \times 10^5} = 0.003 \text{ s}$$

(2) 由冲量定义, 子弹在枪筒中所受合力的冲量

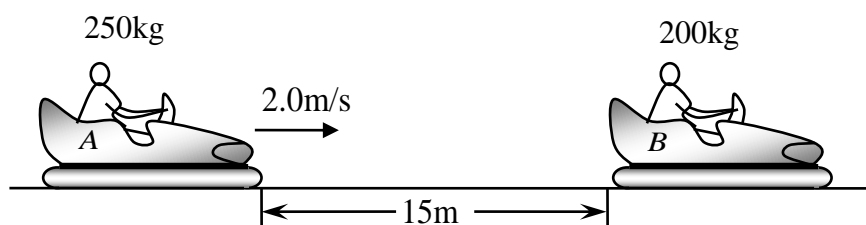
$$I = \int_0^t F dt = \int_0^{0.003} \left( 400 - \frac{4 \times 10^5}{3}t \right) dt = 0.6 \text{ N} \cdot \text{s}$$

(3) 以子弹为研究对象, 其  $v_0 = 0, v = 300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 由动量定理:

$$I = mv - mv_0$$

$$m = \frac{I}{v} = \frac{0.6}{300} = 2 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

8. 如习题图 1-12 所示, 两个小孩在玩雪橇, 雪橇 A 与人的总质量为 250kg, 雪橇 B 与人的总质量为 200kg, 两雪橇之间的距离为 15m。最初雪橇 B 静止, 雪橇 A 从静止开始以加速度  $1.5 \text{ m/s}^2$  加速到 5m/s 后匀速运动, 试问: (1) 雪橇 A 撞上雪橇 B 需要多少时间? (2) 两雪橇碰撞后, 雪橇 B 的运动速度为 4.8m/s、方向向右, 雪橇 A 的速度是多少? (3) 两雪橇的碰撞是完全弹性碰撞吗?



习题图 1-12

解：（1）雪橇 A 在速度达到 5m/s 前作匀加速直线运动，则

$$v_A = v_0 + at_1$$

$$t_1 = \frac{v_A - v_0}{a} = \frac{3}{1.5} \text{ s} = 2 \text{ s}$$

雪橇 A 向右运动的距离为：

$$s_1 = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 = 2 \times 2 + \frac{1}{2} \times 1.5 \times 2^2 \text{ m} = 7 \text{ m}$$

之后，A 作匀速直线运动，碰到雪橇 B 的运动时间为：

$$t_2 = \frac{15 - s_1}{v_A} = \frac{15 - 7}{5} \text{ s} = 1.6 \text{ s}$$

则 A 撞上 B 需要的时间为：

$$t = t_1 + t_2 = 2 + 1.6 \text{ s} = 3.6 \text{ s}$$

（2）由动量守恒定理得：

$$m_A v_A = m_A v_A' + m_B v_B$$

$$v_A' = \frac{m_A v_A - m_B v_B}{m_A}$$

$$= \frac{250 \times 5 - 200 \times 4.8}{250} \text{ m/s}$$

$$= 1.16 \text{ m/s} \quad \text{雪橇 A 的速度向右}$$

（3）碰撞前 A、B 的总动能为：

$$E_{k0} = \frac{1}{2} m_A v_A^2 = \frac{1}{2} \times 250 \times 5^2 \text{ J} = 3125 \text{ J}$$

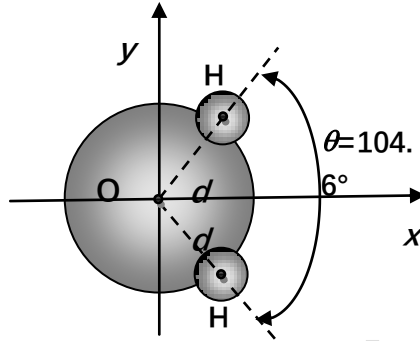
碰撞后两者的总动能为：

$$E_k = \frac{1}{2} m_A v_A'^2 + \frac{1}{2} m_B v_B^2$$

$$= \frac{1}{2} \times 250 \times 1.16^2 + \frac{1}{2} \times 200 \times 4.8^2 \text{ J} = 2472 \text{ J}$$

可见碰撞前后系统与动能不守恒，碰撞为不完全弹性碰撞。

9. 水分子  $\text{H}_2\text{O}$  的结构如习题图 1-13，氢原子与氧原子之间的距离均  $d=1.0\times 10^{-10}\text{m}$ ，氢原子与氧原子两条连线的夹角为  $\theta=104.6^\circ$ ，试求水分子的质心位置？



习题图 1-13

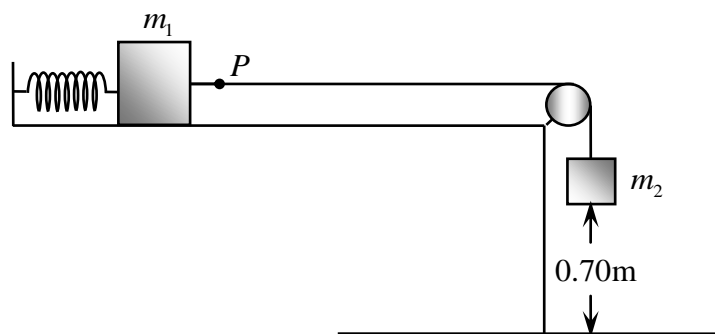
解：根据对称性可知，质心  $C$  的位置在对称轴（ $x$  轴）上，即  $y_C=0$   
由质心的计算公式可得：

$$x_C = \frac{\sum_i m_i x_i}{\sum_i m_i} = \frac{m_H x_1 + m_O x_2 + m_H x_3}{m_H + m_O + m_H} = \frac{2 \times m_H d \cos(\frac{\theta}{2})}{m_H + m_O + m_H}$$

$$x_C = \frac{\sum_i m_i x_i}{\sum_i m_i} = \frac{2 \times 1 \times 1.0 \times 10^{-10} \cos(52.3^\circ)}{1 + 16 + 1} = 6.8 \times 10^{-12} \text{m}$$

即水分子的质心在对称轴上距离氧原子中心  $6.8 \times 10^{-12} \text{m}$  处。

10. 如习题图 1-14 所示，原长  $l_0 = 0.2\text{m}$  的弹簧，一端被固定在光滑的水平桌面上，另一端连着一个  $m_1 = 8.0\text{kg}$  的物体，同时该物体又通过定滑轮与  $m_2 = 4.0\text{kg}$  的物体相连（绳和定滑轮质量不计）。当整个系统达到平衡状态时，弹簧的长度  $l = 0.25\text{m}$ ，物体  $m_2$  离地高度为  $h = 0.70\text{m}$ 。试求：（1）弹簧的劲度系数；（2）如果从  $P$  点将绳子切断，物体  $m_2$  多久后落地；（3）绳子切断后，物体  $m_1$  的振动频率以及  $m_1$  达到的最大速度。



习题图 1-14

解：（1）由胡克定律得：

$$m_2 g = k(l - l_0)$$

$$k = \frac{m_2 g}{l - l_0} = \frac{4.0 \times 10}{0.25 - 0.2} \text{ N/m} = 800 \text{ N/m}$$

（2）绳子断后  $m_2$  作自由落体运动，则

$$H = \frac{1}{2} g t^2$$

$$t = \sqrt{2H / g} = \sqrt{2 \times 0.70 / 10} \text{ s} = 0.37 \text{ s}$$

（3）由弹簧振子的振动频率得：

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{2m_1}} = \sqrt{\frac{800}{8}} \text{ rad/s} = 10 \text{ rad/s}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{10}{2 \times 3.14} \text{ Hz} = 1.59 \text{ Hz}$$

由机械的守恒定律得：

$$\frac{1}{2} k x^2 = \frac{1}{2} m_1 v_{\max}^2$$

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{k}{m_1}} x_{\max}$$

$$= \sqrt{\frac{k}{m_1}} (l - l_0)$$

$$= \sqrt{\frac{800}{8.0}} \times (0.25 - 0.2) \text{ m/s}$$

$$= 0.5 \text{ m/s}$$

11. 一质量为  $1\text{kg}$  的质点沿  $x$  方向从原点开始运动，其运动速度与时间的关系为  $v = 8 - 8t$  (SI)。试求：(1)  $t = 2\text{s}$  时，该质点的位置和加速度分别是多少？(2) 在  $0$  到  $2$  秒时间内，质点所受合外力作的功是多少？

解：(1) 由位移与速度的关系得：

$$v = \frac{dx}{dt}$$

$$x = x_0 + \int_0^t v dt$$

$$= \int_0^t (8 - 8t) dt$$

$$= 8t - 4t^2$$

当  $t = 2\text{s}$  时， $x = 8 \times 2 - 4 \times 2^2 \text{ m} = 0\text{m}$

由速度与加速度的关系得： $a = \frac{dv}{dt}$

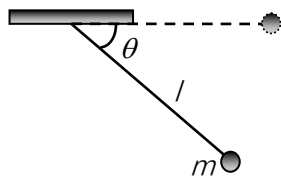
$$a = \frac{d}{dt}(8 - 8t) = -8 \text{ m/s}^2$$

(2) 由功的定义得： $W = Fx$

由(1)中可知， $0 \sim 2\text{s}$  之间， $x = 0$ ，则  $W = 0\text{J}$ 。

12. 如习题图 1-15 所示，质量为  $m$  的小球系在细线的一端，线另一端固定在墙上，线长为  $l$ 。将小球拉至水平位置，然后静止释放使其下落，试求：线摆下  $\theta$  角时小球的速率和线的张力？要求采用三种不同的质点运动学原理进行求解，并对比分析三种求解方法的优劣。





习题图 1-15

解：

方法一：牛顿第二定律

小球受重力  $mg$  和拉力  $T$ 。由于小球沿圆周运动，需要列出牛顿第二定律的切向和法向分量式。在任意时刻，切向方向上：

$$mg\cos\theta = ma_t = m \frac{dv}{dt}$$

两侧同乘以  $ds$ ,

$$mg\cos\theta \cdot ds = m \frac{dv}{dt} ds = m \frac{ds}{dt} dv$$

由于  $ds = l d\theta$ ,  $\frac{ds}{dt} = v$ , 所以上式可写为

$$gl\cos\theta \cdot d\theta = v dv$$

两侧同时积分，由于摆角从 0 增大到  $\theta$ , 速率从 0 增大到  $v$ , 所以有

$$\int_0^\theta gl\cos\theta \cdot d\theta = \int_0^v v dv$$

$$\text{得 } gl\sin\theta = \frac{1}{2}v^2$$

$$v = \sqrt{2gl\sin\theta}$$

对于小球，在任意时刻，牛顿第二定律的法向分量式为

$$T - mg\sin\theta = ma_n = m \frac{v^2}{l}$$

将  $v = \sqrt{2gl\sin\theta}$  代入上式，可得线对小球的拉力为：

$$T = 3mg\sin\theta$$

方法二：动能定理

小球从水平 A 点下落至 B 的过程中，合外力做功为：

$$W_{AB} = \int_A^B (\vec{T} + m\vec{g}) \cdot d\vec{r} = \int_A^B m\vec{g} \cdot d\vec{r} = \int_A^B mg |dr| \cos\theta$$

由于  $|\mathrm{d}\vec{r}| = l\mathrm{d}\theta$ ，所以

$$W_{AB} = \int_A^B mgl\cos\theta\mathrm{d}\theta = mgl\sin\theta$$

$$W_{AB} = \int_A^B (\vec{T} + m\vec{g}) \cdot \mathrm{d}\vec{r} = \int_A^B m\vec{g} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = \int_A^B mg|\mathrm{d}\vec{r}|\cos\theta$$

对于小球，利用动能定理，由于  $v_A=0$ ， $v_B=v_q$ ，

$$mgl\sin\theta = \frac{1}{2}mv^2$$

由此得  $v = \sqrt{2gl\sin\theta}$ ，线对小球的拉力的计算同方法一。

方法三：机械能守恒

取小球和地面作为一个系统，以水平 A 为势能零点，小球下落过程中只有保守力——重力做功，所以系统机械能守恒。

初态时， $v_A=0$  系统的机械能：

$$E_A = mgh_A + \frac{1}{2}mv_A^2 = 0$$

小球下落任意时刻，线摆下  $\theta$  角时， $v_B=v$ ，系统的机械能：

$$E_B = -mgl\sin\theta + \frac{1}{2}mv_B^2$$

$$\text{机械能守恒 } E_A = E_B = -mgl\sin\theta + \frac{1}{2}mv_B^2 = 0$$

$$\text{解得： } v = \sqrt{2gl\sin\theta}$$

线对小球的拉力的计算同方法一。

方法一应用牛顿第二定律，计算时公式的左右两侧“力”和“运动”，都用纯数学方法进行积分运算。方法二中，应用了功和动能的概念，这时只需对力侧进行积分来求功，而运动侧只需计算动能增量。方法三种，没有使用任何积分，这是因为由于引入势能的概念，用计算势能差来代替用线积分去计算功。

总的来说，基本定律不变，但是引入新概念和建立新的定律形式更便于处理实际问题。

---

## 四、开放性习题

物理学发展过程中，科学家们许多次通过理想实验研究物理问题，实验超越了当时科学技术和物理学发展水平，建立起了一个又一个新理论。请查阅资料调研力学发展史上的理想实验，分析它与常规物理实验的异同，并分析这种科学研究方法中蕴含的创新思想和创造性发现。

### 习题指导与参考答案：

本题目的在于引导学生了解“理想实验”这种科学思维方式及抽象实验研究方法，通过调研物理学史中的理想实验及其成就，启发学生领会这种研究方法的适用背景、思维过程与创新发现。

(1) 物理学史中著名的理想实验有：伽利略的“理想斜面”、牛顿的“理想抛体”、马赫的“理想水桶”、爱因斯坦列车等，同学们应详细阐述3个以上理想实验的实验内容、抽象思维方式、推理过程及实验发现，以及这些理想实验结果的意义及其对物理学发展的推动作用。

(2) 同学们应该分析每一个理想实验借助的真实实验是什么，依托的理论观点是什么，拟解决或拟证实的理论问题是什么。

(3) 基于上述内容的研究与分析，谈一谈自己对理想实验这种科学研究方法的认识，分析这种抽象物理实验与真实物理实验的联系，以及它的运用环境及研究优势。

## 第二章 刚体转动

### 一、分析题

1. 某发动机工作时，主轴边缘一点作圆周运动的运动方程为  $\theta = t^3 + 4t + 3(\text{SI})$ 。请问：当  $t = 2\text{s}$  时，该点的角速度和角加速度分别为多少？

答案：16 rad/s；12 rad/s<sup>2</sup>

因为， $\omega = \frac{d\theta}{dt} = 3t^2 + 4$ ； $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = 6t$

当  $t = 2\text{s}$  时， $\omega = 3 \times 2^2 + 4 = 16 \text{ rad/s}$ ， $\alpha = 6 \times 2 = 12 \text{ rad/s}^2$

2. 一个飞轮以 600r/min 的转速旋转，其转动惯量为  $2.5\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。如果要使飞轮在 1s 内停止转动，请问需要施加多大的恒定制动力矩？

答案：157 N·m

因为  $\omega_1 = \frac{600 \times 2\pi}{60} = 2\pi \text{ rad/s}$ ， $\omega_2 = 0$ ，则  $\alpha = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t} = -20\pi \text{ rad/s}^2$ ；

力矩  $M = J\alpha = 2.5 \times (-20\pi) = -157.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，则恒定制动力矩的大小约为 157 N·m。

3. 对于一个可绕定轴转动的刚体，若忽略摩擦力的存在，请判断下列说法是否正确。（A）刚体匀速转动的条件是合外力为零；（B）刚体加速转动的条件是合外力不为零；（C）刚体匀速转动的条件是合外力矩为零；（D）刚体加速转动的条件是合外力矩不为零。

答案：C

根据转动定律  $\vec{M} = J\vec{\alpha}$  可知：刚体匀速转动的条件是合外力矩为零。

4. 关于刚体对轴的转动惯量，下列说法是否正确。（A）只与刚体质量有关，与质量的空间分布和轴的位置无关；（B）与刚体的质量和质量的空间分布有关，与轴的位置无关；（C）与刚体的质量、质量的空间分布和轴的位置都有关；（D）只与转轴的位置有关，与刚体的质量和质量的空间分布无关。

答案：C

根据  $J = \int_m r^2 dm$  可知刚体对轴的转动惯量与刚体的质量、质量的空间分布和轴的位置都有关。

5. 有一个刚体在两个力的作用下绕固定转轴转动。当两个力的合力为零时，它们对刚体产生的合力矩为零吗？当两个力对刚体产生的合力矩为零时，它们的合力也为零吗？请说明原因。

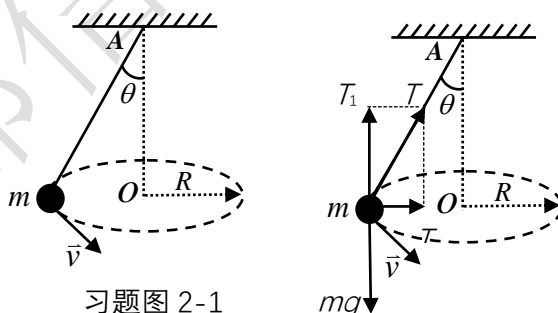
答案：不一定；不一定

两个力的合力为零，但力的作用点不同时，由于力矩  $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$ ，合力矩不一定为零。同理，即使合外力不为零，但当合外力过刚体转轴时，合力矩也为零。

6. 跳水运动员跳水时，为何刚起跳时要立刻把身体缩成一团，而在快入水时候又把身体展开？

答案：根据角动量守恒定律，起跳时缩起身体，是为了减小  $J$ ，增大  $\omega$ ，能够快速旋转，有利于调整节奏，保证快入水时能直线进入水中；快入水时候把身体展开，是为了增大  $J$ ，减小  $\omega$ ，保证入水时能直线进入水中，减小水花，获得高分。

7. 如习题图 2-1 所示，一个圆锥摆固定于  $A$  点，质量为  $m$  的小球在水平面内围绕  $O$  点做半径为  $R$  的圆周运动，那么对其角动量的相关描述中，正确的说法有哪些。（A）小球对  $A$  点角动量守恒；（B）小球对  $O$  点角动量守恒；（C）小球对  $A$  点和  $O$  点角动量都守恒；（D）小球对  $A$  点和  $O$  点角动量都不守恒。



习题图 2-1

答案：B

由于合外力矩为零，角动量守恒。如习题图 2-1 所示，小球受到重力  $mg$  及拉力  $T$ ，合外力为指向圆心  $O$  的  $T_2$ ，因此小球对  $O$  点的合外力矩为零，角动量守恒。

8. 宇航员在飞船内悬浮站立。在不触及飞船壁的情况下，请问：（1）若宇航员用右脚沿顺时针方向划圈，他的身体怎样运动？（2）若他伸开两臂伸向后划圈，身体又会怎样运动？请说明原因。

答案：（1）会向左转；（2）会向前转；原因：基于角动量守恒

当宇航员悬立在飞船座舱内的空中时，在不接触舱壁的情况下，他所受的合外力矩为零，即角动量守恒，因而此时如果他用右脚顺时针划圈，他的身体就会向左转，当他的臂伸直向后划圈时，他的身体就会向前转。

9. 假定时钟的指针是质量均匀的矩形薄片，分针长而细，时针短而粗，但两者具有相等的质量。请问：哪个指针的转动惯量更大？哪个指针的动能更大？哪个指针的角动量更大？

答案：分针；分针；分针

质量相同的刚体对轴的转动惯量和质量分布有关。由于分针细长，时针短粗，所以分针对转轴的转动惯量更大。由于分针转动的角速度大于分针转动的角速度，由转动动能  $E = \frac{1}{2} J \omega^2$  可知，分针的转动动能更大。由  $L = J \omega$  可知，分针的角动量更大。

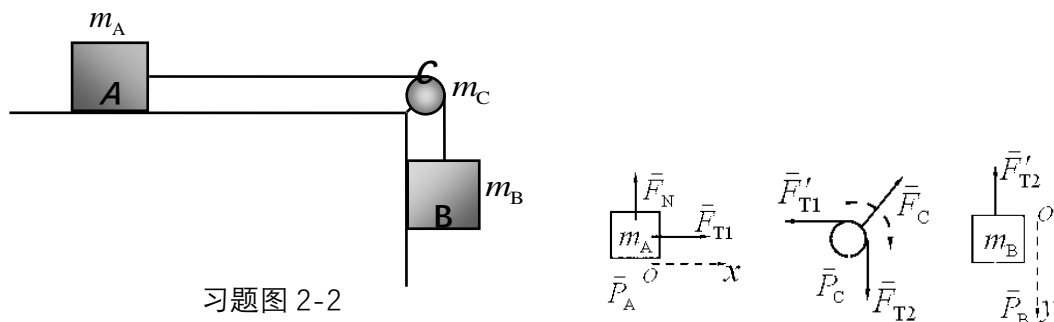
10. 有一个垂直悬挂的细棒可以绕上端点自由旋转，开始时处于垂直静止状态，现有一水平方向快速运动的子弹，与细棒的下端碰撞，如果将细棒和子弹作为一个系统，下列说法是否正确。（A）碰撞瞬间系统所受合外力为零；（B）碰撞瞬间机械能守恒；（C）碰撞瞬间系统动量守恒；（D）碰撞瞬间系统角动量守恒。

答案：D

因为碰撞瞬间系统所受合外力矩为零，所以系统角动量守恒。

### 三、综合题

1. 物体 A 静止在光滑水平面上，经绳索绕过半径为  $R$  的圆柱形滑轮 C，与物体 B 相连，如习题图 2-2 所示。滑轮与绳索间无滑动，且滑轮与轴承间的摩擦力可略去不计。试求：（1）两个物体的线加速度；（2）绳索在水平和竖直两段上的张力；（3）物体 B 从静止开始，下落距离  $y$  时的速率。



习题图 2-2

解：（1）用隔离法分别对各物体作受力分析，取如图所示坐标系。

$$\begin{cases} F_{T1} = m_A a \\ m_B g - F_{T2} = m_B a \\ R F_{T2} - R F_{T1} = J \alpha \\ a = R \alpha \end{cases}$$

解得：

$$\begin{cases} a = \frac{m_B g}{m_A + m_B + m_C / 2} \\ F_{T1} = \frac{m_A m_B g}{m_A + m_B + m_C / 2} \\ F_{T2} = \frac{(m_A + m_C / 2) m_B g}{m_A + m_B + m_C / 2} \end{cases}$$

如令  $m_C = 0$ ，可得  $F_{T1} = F_{T2} = \frac{m_A m_B g}{m_A + m_B}$

（2）B 由静止出发作匀加速直线运动，下落的速率

$$v = \sqrt{2ay} = \sqrt{\frac{2m_B g y}{m_A + m_B + m_C / 2}}$$

2. 一辆行驶速度为 108 km/h 的汽车，车轮的外圈半径为 0.5 m，汽车所有车轮的转动惯量为  $J = 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。在  $t = 0$  时刻汽车开始制动，如果总的制动摩擦力矩为  $M_f = 100 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，请问：（1）汽车需要多长时间可以停下来？（2）从开始制动到停止，汽车行驶了多远距离？

解：（1）汽车的初始行驶速度为 108 km/h 即 30 m/s，汽车的初始角速度为

$$\omega_0 = \frac{v}{r} = \frac{30}{0.5} \text{ rad/s} = 60 \text{ rad/s}$$

开始制动后角加速度为

$$\alpha = \frac{-M_f}{J} = \frac{-100\text{N}\cdot\text{m}}{20\text{kg}\cdot\text{m}^2} = -5\text{rad/s}^2$$

则制动需要的时间为

$$t = \frac{\omega - \omega_0}{\alpha} = \frac{0 - 60\text{rad/s}}{-5\text{rad/s}^2} = 12\text{s}$$

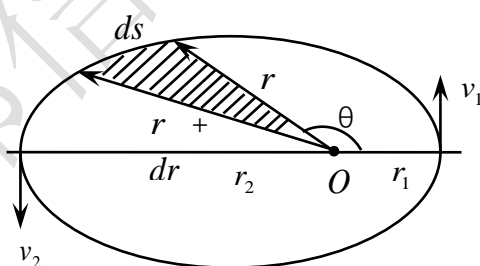
(2) 从开始制动到停止, 车轮转过的角度为

$$\theta = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\alpha} = \frac{-(60\text{rad/s})^2}{2 \times (-5\text{rad/s}^2)} = 360\text{rad}$$

则走过的距离为

$$s = r\theta = 0.5\text{m} \times \theta = 180\text{m}$$

3. 如习题图 2-3 所示, 一绕地飞行的卫星数据为: 质量为  $m = 143\text{kg}$ , 周期为  $T = 98\text{min}$ , 近地点到地心距离为  $r_1 = 6670\text{km}$ , 远地点到地心距离为  $r_2 = 8890\text{km}$ , 椭圆轨道半长轴为  $b = 7780\text{km}$ , 椭圆轨道半短轴为  $a = 7220\text{km}$ , 试求: 卫星的近地点速度和远地点速度(提示: 卫星绕椭圆轨道运动的周期为  $T = \frac{2\pi ab}{r v}$ )。



习题图 2-3

解: 在地心引力作用下, 卫星作椭圆轨道运动, 且角动量守恒。

设卫星近地速度为  $v_1$ , 方向与  $r_1$  垂直; 远地速度为  $v_2$ , 方向与  $r_2$  垂直, 则

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2} r_1 v_1 = \frac{1}{2} r_2 v_2 \text{ 为常量}$$

于是

$$s = \frac{1}{2} r_1 v_1 T = \frac{1}{2} r_2 v_2 T$$



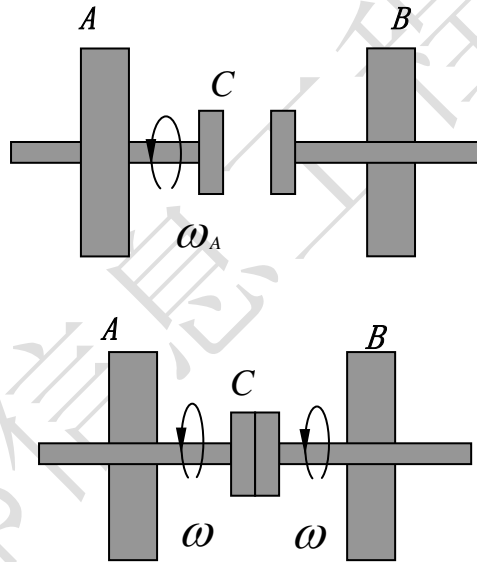
近地点速度

$$v_1 = \frac{2s}{r_1 T} = \frac{2\pi ab}{r_1 T} = \frac{2 \times 3.14 \times 7780 \text{ km} \times 7220 \text{ km}}{6670 \text{ km} \times 98 \times 60 \text{ s}} = 8.99 \text{ km/s}$$

远地点速度

$$v_2 = \frac{2s}{r_2 T} = \frac{2\pi ab}{r_2 T} = \frac{2 \times 3.14 \times 7780 \text{ km} \times 7220 \text{ km}}{8890 \text{ km} \times 98 \times 60 \text{ s}} = 6.74 \text{ km/s}$$

4. 如习题图 2-4 所示, A 和 B 两飞轮的轴杆在同一中心线上, A 轮的转动惯量为  $J_A = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , B 轮的转动惯量为  $J_B = 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。开始时 A 轮的转速为  $600 \text{ r/min}$ , B 轮静止。C 为摩擦啮合器。求 (1) 两轮啮合后的转速; (2) 在啮合过程中, 两轮的机械能有何变化?



习题图 2-4

解:  $\omega_A = 600 \times 2\pi / 60 \text{ rad/s} = 20\pi \text{ rad/s}$

(1) 以两飞轮和啮合器作为一系统来考虑, 角动量守恒。

$$\omega = \frac{J_A \omega_A + J_B \omega_B}{(J_A + J_B)}$$

将各值代入得两轮啮合后角速度

$$\omega = \frac{10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \times 20\pi \text{ rad/s}}{10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 + 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^2} = \frac{20\pi}{3} \text{ rad/s}$$

即转速  $n = 200\text{r/min}$

(2) 在啮合过程中, 摩擦力矩做功, 所以机械能不守恒, 部分机械能将转化为热量, 损失的机械能为

$$\begin{aligned}\Delta E &= \frac{1}{2}J_A\omega_A^2 + \frac{1}{2}J_B\omega_B^2 - \frac{1}{2}(J_A + J_B)\omega^2 \\ &= \frac{1}{2} \times 10\text{kg} \cdot \text{m}^2 \times (20\pi\text{rad/s})^2 - \frac{1}{2}(10\text{kg} \cdot \text{m}^2 + 20\text{kg} \cdot \text{m}^2) \left(\frac{20\pi}{3}\text{rad/s}\right)^2 = 1.32 \times 10^4 \text{J}\end{aligned}$$

5. 飞机沿水平方向飞行, 机头螺旋桨转轴与飞机的飞行方向一致, 螺旋桨叶片的长度为  $180\text{cm}$ , 发动机转速为  $2200\text{r/min}$ 。试求: (1) 桨尖相对于飞机的线速率是多少? (2) 若飞机以  $216\text{km/h}$  的速率飞行, 计算桨尖相对于地面速度的大小是多少? 并定性说明桨尖的运动轨迹。

解: (1) 桨尖相对于飞机的线速率:

$$v_1 = \omega R = \frac{2\pi \times 2200}{60} \times 1.8\text{m/s} = 414.48\text{m/s}$$

(2) 因为桨尖相对于飞机的线速度与飞机前行的速度互相垂直, 飞机的前行速度为  $216\text{km/h}$  即  $60\text{m/s}$ , 所以桨尖相对于地面速度的大小:

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + 60^2} \text{m/s} = 418.80\text{m/s}$$

由于桨尖同时参与两个运动: 匀速直线运动和匀速圆周运动. 故桨尖轨迹应是一个圆柱螺旋线。

6. 一转动飞轮的半径为  $r = 0.5\text{m}$ , 转动惯量为  $J = 10\text{kg} \cdot \text{m}^2$ , 转速为  $\omega = 52\text{rad/s}$ , 两制动闸对轮的压力都为  $325\text{N}$ , 闸瓦与轮缘间的摩擦系数为  $\mu = 0.4$ . 试求: 从开始制动到静止, 一共需要用多少时间?

解: 因为制动总的力矩为:

$$M_f = 2\mu Nr = 2 \times 0.4 \times 325\text{N} \times 0.5\text{m} = 130\text{N} \cdot \text{m}$$

则角加速度为

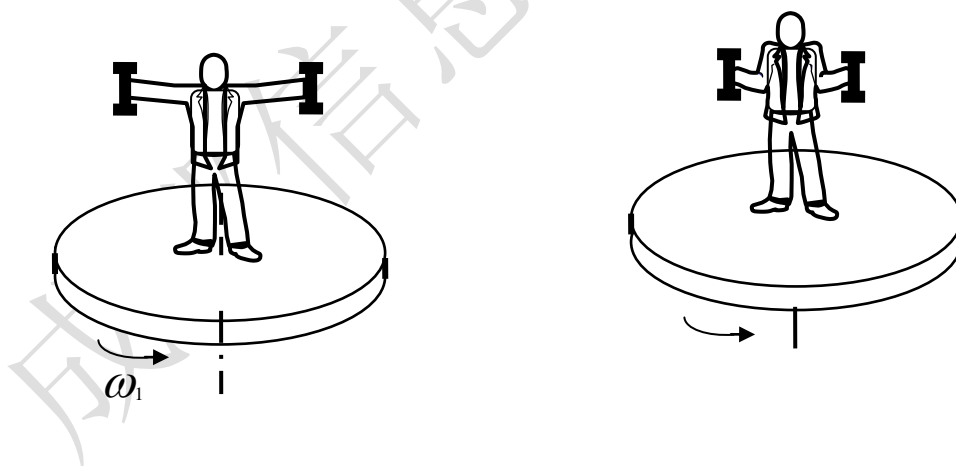
$$\alpha = \frac{-M_f}{J} = \frac{-130\text{N}\cdot\text{m}}{10\text{kg}\cdot\text{m}^2} = -13\text{rad/s}^2$$

则制动需要的时间为

$$t = \frac{\omega - \omega_0}{\alpha} = \frac{0 - 52\text{rad/s}}{-13\text{rad/s}^2} = 4\text{s}$$

即开始制动到静止需要 4s 时间。

7. 如习题图 2-5 所示，一人站在自由转动的圆盘中心（不计摩擦），人与转盘的转动惯量  $J_0 = 100\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ，人手臂伸直后的长度为 1m（人的手掌与人体中心轴线距离），手臂完全收拢时长度为 0.2m。人的每只手各抓有一个质量  $m = 5\text{kg}$  的哑铃。试问：（1）在人伸缩手臂的过程中，人、哑铃与转盘组成的系统的角动量是否守恒？为什么？（2）如果人伸直手臂时，系统转动角速度  $\omega_1 = 3\text{rad/s}$ ，人收拢手臂时的角速度  $\omega_2$  是多少？（3）系统在转动的过程中，机械能是否守恒？为什么？



解：（1）整个过程合外力矩为 0，角动量守恒。

$$(2) J_1 = J_0 + 2ml_1^2 = 100\text{kg}\cdot\text{m}^2 + 2 \times 5\text{kg} \times (1\text{m})^2 = 110\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

$$J_2 = J_0 + 2ml_2^2 = 100\text{kg}\cdot\text{m}^2 + 2 \times 5\text{kg} \times (0.2\text{m})^2 = 100.4\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

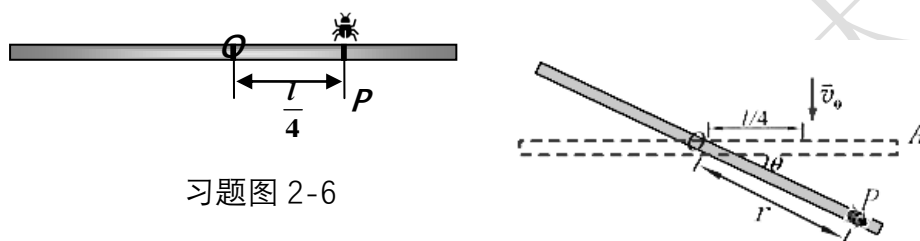
因为

$$J_1\omega_1 = J_2\omega_2$$

所以 
$$\omega_2 = \frac{J_1 \omega_1}{J_2} = \frac{110 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \times 3 \text{ rad/s}}{100.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2} = 3.29 \text{ rad/s}$$

(3) 在此过程中机械能不守恒，因为人收臂时做功。

8. 一质量较小长度为  $l$  的均匀细杆，可绕过其中心点  $O$ 、与纸面垂直的转轴，在竖直平面内转动，如习题图 2-6 所示。假设细杆静止于水平位置，突然有一只小虫以速率  $v_0$  垂直落在杆上的  $P$  点，并向细杆端点  $A$  爬行， $O$ 、 $P$  两点的距离为  $l/4$ 。若细杆和小虫的质量均为  $m$ ，试求：(1) 虫与杆的碰撞前后，系统的角速度；(2) 若细杆以恒定的角速度转动，小虫在细杆上爬行速度是多少？



习题图 2-6

解：(1) 碰撞前细杆静止，小虫的角速度为  $\frac{lv_0}{4}$

虫与杆的碰撞前后，系统角动量守恒  $mv_0 \frac{l}{4} = \left[ \frac{1}{12} ml^2 + m \left( \frac{l}{4} \right)^2 \right] \omega$

得碰撞后系统的角速度  $\omega = \frac{12}{7} \frac{v_0}{l}$

(2) 由角动量定理

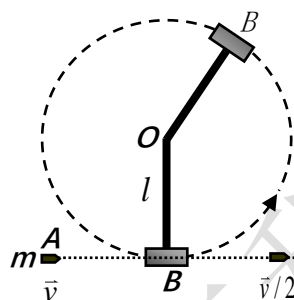
$$M = \frac{dL}{dt} = \frac{d(J\omega)}{dt} = \omega \frac{dJ}{dt}$$

$$mgr \cos \theta = \omega \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{12} ml^2 + mr^2 \right) = 2mr\omega \frac{dr}{dt}$$

考虑到  $\theta = \omega t$

得  $\frac{dr}{dt} = \frac{g}{2\omega} \cos \omega t = \frac{7lg}{24v_0} \cos \left( \frac{12v_0}{7l} t \right)$  即小虫需具有的爬行速率。

9. 如习题图 2-7, 摆锤由一根长为  $l$ 、质量为  $M$  的匀质细棒和一个质量为  $M$  的锤  $B$  组成, 摆锤的一端  $O$  固定, 但摆锤能在竖直平面内绕  $O$  点无摩擦地转动。假设一颗子弹以速率  $v$  从左边射入摆锤, 子弹质量为  $m$ , 穿过摆锤后子弹速率为  $v/2$ 。试求: (1) 摆锤对  $O$  点的转动惯量; (2) 若以子弹和摆锤作为一个系统, 在子弹穿过摆锤瞬间, 系统的角动量是否守恒? 子弹穿过摆锤后, 系统的角速度是多少? (3) 若摆锤恰好能在竖直平面作一个完整的圆周运动, 那么子弹速度的最小值为多少?



习题图 2-7

解: (1) 转动惯量为  $J = J_{\text{棒}} + J_{\text{锤}} = \frac{1}{3}Ml^2 + Ml^2 = \frac{4}{3}Ml^2$

(2) 以子弹和摆锤作为一个系统, 系统的角动量守恒。

$$mvl = m \frac{v}{2}l + J\omega \quad \text{得 } \omega = \frac{3vm}{8lM}$$

(3) 在摆锤上摆到最高点的过程中, 假设角速度恰好为 0,

$$\text{由机械能守恒定律: } \frac{1}{2}J\omega^2 + \frac{1}{2}Mgl = \frac{3}{2}Mgl + Mg(2l)$$

$$\text{由此解得, 子弹的最小速度应为 } v = \frac{4M}{m}\sqrt{2gl}$$

10. 一吊扇的第一档转速为  $n_1=7\text{rad/s}$ 、第二档转速为  $n_2=10\text{rad/s}$ , 吊扇转动时受到阻力矩  $M_f$  的作用, 假设阻力矩与吊扇角速度之间的关系为  $M_f=k\omega^2$ , 其中系数  $k=2.74\times 10^{-4}\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-2}\cdot\text{s}^2$ 。试求: (1) 吊扇电机在两种转速下的功率; (2) 吊扇从静止开始逐渐加速到第二档转速用了  $5\text{s}$ , 在这个过程中阻力矩做的功是多少?

解： (1)  $P_1 = M_{f1}\omega_1 = k\omega_1^3 = k(2\pi n_1^3) = 23.3 \text{ W}$

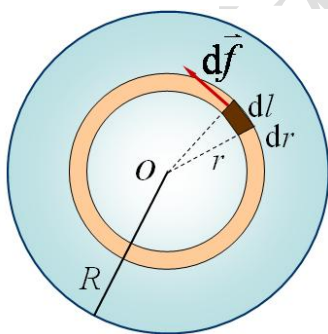
$$P_2 = M_{f2}\omega_2 = k\omega_2^3 = k(2\pi n_2^3) = 68.0 \text{ W}$$

(2) 吊扇由静止作匀角加速度运动  $\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{2\pi n_2}{5} \quad \omega = \alpha t$

$$\text{阻力矩做功 } W = \int M_{f2} d\theta = \int k\omega^3 dt \quad W = \int_0^t k\alpha^3 t^3 dt = \frac{1}{4} k\alpha^3 t^4$$

在  $t=5\text{s}$  时间内  $W=84.8 \text{ J}$

11. 留声机转盘绕过其盘心、垂直于盘面的转轴，以角速率  $\omega$  作匀速转动，在放上唱片后，唱片将在摩擦力作用下随转盘一起转动。设唱片质量为  $m$ 、半径为  $R$ ，与转盘间的摩擦系数为  $\mu$ ，试求：(1) 唱片与转盘之间的摩擦力矩；(2) 唱片达到角速度  $\omega$  需要的时间；(3) 在这段时间内，转盘所受摩擦力矩做的功。



解：(1) 如图取面积元  $ds = drdl$ ，该面元所受的摩擦力为

$$df = \frac{\mu mg}{\pi R^2} drdl, \text{ 此力对点 } O \text{ 的力矩为 } rdf = \frac{\mu mg}{\pi R^2} r drdl$$

于是，在宽为  $dr$  的圆环上，唱片所受的摩擦力矩为

$$dM = \frac{\mu mg}{\pi R^2} r dr (2\pi r) = \frac{2\mu mg}{R^2} r^2 dr$$

$$M = \frac{2\mu mg}{R^2} \int_0^R r^2 dr = \frac{2}{3} \mu R mg$$

(2) 由转动定律求  $\alpha$ ，(唱片  $J = mR^2/2$ )

$$\alpha = \frac{M}{J} = \frac{4\mu g}{3R} \quad (\text{作匀加速转动})$$

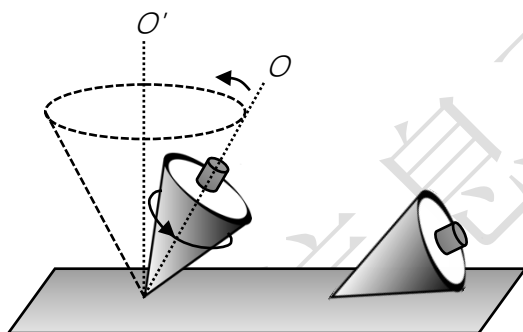
由  $\omega = \omega_0 + \alpha t$  , 可求得  $t = \frac{3\omega R}{4\mu g}$

(3) 由  $\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\theta$  , 可得在 0 到  $t$  的时间内, 转过的角度为  $\theta = \frac{3\omega^2 R}{8\mu g}$

驱动力矩做的功为  $W = M\theta = \frac{1}{4}mR^2\omega^2$

#### 四、开放性习题

刚体除了绕转动轴的转动以外, 还可以绕定点进行转动, 陀螺运动就是一种典型的定点转动, 如习题图 2-7。请通过调研分析, 定性回答下列问题: 陀螺的运动与刚体的定轴转动有什么不同? 并解释为什么陀螺静止时只会躺在地面上, 而当它高速旋转时即使自身发生严重倾斜也不会轻易地倒地。

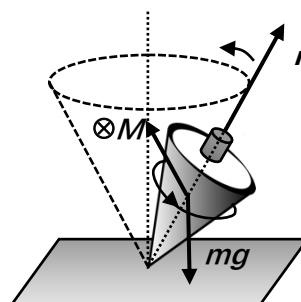


习题图 2-7

#### 习题指导与参考答案:

本题目的在于拓展学生知识面和锻炼学生分析复杂问题的能力。在学习了刚体转动中最特殊的定轴转动之后, 了解进动这一实际复杂转动问题, 并能定性解释进动等相关现象。

1、刚体的定轴转动是指物体围绕一个固定转轴的转动, 该转轴在空间的取向不变。陀螺运动中则同时存在两种转动, 一是陀螺绕其中心对称轴  $O$  自转, 但该转轴  $O$  的空间取向不断变化, 其运动轨迹构成一个圆锥面; 二是陀螺又在做定点转动, 转



---

动点为陀螺与地面的接触点。陀螺的运动为这两种转动的合成，构成物体自转轴  $O$  绕另一轴  $O'$  转动的复杂转动，这称为进动，如图所示。

2、当陀螺静止不动时，不论它处于怎样的位置，重力矩的作用都会使它倒地，最终躺在地面上。

当陀螺在外力作用下开始高速旋转，若忽略空气阻力，当外力撤去后依然不会轻易倒地。主要原因为：

(1) 当陀螺处于竖直旋转状态，即轴  $O$  沿竖直方向，陀螺虽然具有自转角动量为  $L$ ，但陀螺只受重力矩作用，由于力臂为零，重力矩  $M=0$ ，陀螺在不受外力矩作用下是，将维持其转动状态而不会倒地。

(2) 当高速转动的陀螺发生倾斜时，即轴  $O$  偏离竖直方向，陀螺仍然只受重力矩作用，但是重力矩却不为 0，力矩  $M$  方向如图所示， $M$  垂直于陀螺转轴  $O$  的方向。重力矩  $M$  的作用将不断改变陀螺自转轴  $O$  的空间取向，使其绕竖直轴  $O'$  转动，而不会使陀螺倒地，从而形成陀螺的进动现象。



## 第三章 相对论

### 一、分析题

1. 在真空中有 A、B 两个光子，请问在以下两种情况下，光子 A 相对于光子 B 的速度：（1）A、B 反向而行；（2）A、B 相向而行。

答案：（1） $c$ ；（2） $c$

根据狭义相对论光速不变原理可知。

2. 关于“同时”有人给出了以下一些结论，请问哪个是正确的。（A）在某一惯性系同时发生的两个事件，在另一惯性系一定不同时发生；（B）在某一惯性系不同地点、同时发生的两个事件，在另一惯性系一定同时发生；（C）在某一惯性系同一地点、同时发生的两个事件，在另一惯性系一定同时发生；（D）在某一惯性系不同地点、不同时发生的两个事件，在另一惯性系一定不同时发生。

答案：C

根据同时的相对性，只有在某一惯性系同一地点、同时发生的两个事件，在另一惯性系才一定同时发生。

3. 在狭义相对论中，为什么测量的长度和参考系有关？

答：当测量运动的细棒的长度时（细棒沿长度方向运动），要求同时测量细棒两端的坐标，因此长度测量就与时间测量联系起来了。由于记录细棒两端的坐标这两事件的时间间隔在不同参考系是不同的，所以长度的测量就和参考系有关。

4. 在洛伦兹变换式中，什么物理量是不变的？

答案：光速  $c$

洛伦兹变换式是按照狭义相对论的基本原理，在光速不变的前提下，得到两个参考系之间的时空坐标变换式。

5. 银河系的直径大致为 10 万光年，1 光年是光在 1 年之内走过的距离。如果有人乘坐一艘以光速飞行的宇宙飞船横穿银河系，他将在飞船上度过多少时间？为什么？

---

答：时间为零，因为根据狭义相对论长度  $l = l_0 \sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}$  可知，对乘坐速度为光速的宇宙飞船的人，银河系的直径等于零。

6. 在地球上观察到一束光在  $t_1$  时刻发出，另一束光在  $t_2$  时刻发出，那么地球上的计时器显示这两束光发出的时间差是  $\Delta t = t_2 - t_1$ 。假定光束本身可以计时，是不是第二束光认为自己与第一束光发出的时间差也是  $\Delta t = t_2 - t_1$ ？为什么？

答：时间间隔为零，因为对于光线来讲，经历的时间永远为零。

7. 如果我们乘坐一艘宇宙飞船从地球旁经过，飞船相对于地球的速度为光速的一半，那么我们看到的地球还是圆形吗？如果宇宙飞船的速度等于光速，我们看到的地球是什么形状？为什么？

答：飞行速度为二分之一光速时地球是椭圆，因为前进方向长度收缩；宇宙飞船的速度等于光速时地球是一个没有厚度的圆盘，因为前进方向没有长度了。

8. 一个物体在持续的外力作用下，它的速度是不是可以无限制地增加？为什么？

答：不会无限增加，因为随着速度增加，物体质量即惯性就越来越大，速度极限是光速，但永远达不到光速。

9. 如果某微观粒子的总能量是它静止能量的  $N$  倍，那么该粒子的运动速度是多少？

答案：  $\frac{c}{N} \sqrt{N^2 - 1}$

由质能关系  $E = mc^2$ ，  $E_0 = m_0 c^2$ ，  $E/E_0 = m/m_0 = N$ ，

根据质速关系  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{u}{c})^2}}$ ，得该粒子的运动速度  $u = \frac{c}{N} \sqrt{N^2 - 1}$

10. 若粒子的相对论性动量等于其非相对论动量的两倍，那么粒子的运动速度是多少？若粒子的相对论性动能等于其非相对论动能的两倍，那么粒子的运动速度又是多少？

答案:  $v = \frac{\sqrt{3}}{2}c = 0.866c$ ;  $v = \sqrt{\frac{\sqrt{5}-1}{2}}c = 0.786c$

设粒子速度为  $v$ , 静止质量为  $m_0$ 。则其经典动量大小为  $p_0 = m_0 v$ , 相对论动量大小为  $p = \gamma m_0 v$ ,

$$\text{令 } \frac{p}{p_0} = \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = 2, \text{ 可得 } v = \frac{\sqrt{3}}{2}c = 0.866c$$

粒子的经典动能为  $E_{k0} = \frac{1}{2}m_0 v^2$ , 相对论动能为  $E_k = mc^2 - m_0 c^2 = (\gamma - 1)m_0 c^2$ , 令

$$\frac{E_k}{E_{k0}} = \frac{(\gamma - 1)m_0 c^2}{\frac{1}{2}m_0 v^2} = 2, \text{ 于是 } \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} - 1 = \frac{v^2}{c^2}$$

$$\text{得到 } v = \sqrt{\frac{\sqrt{5}-1}{2}}c = 0.786c$$

## 二、综合题

1. 一艘宇宙飞船以  $v = 0.6c$  的速度从地球上静止的观察者面前飞过, 假设飞船上安装有一个边长为  $1\text{m}$  的立方体, 则该观察者看到的物体形状是什么? 边长为多少?

解: 地球上的观察者看到这个物体的形状是长方体, 在前进方向看到的长度为

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1\text{m} \times \sqrt{1 - \frac{(0.6c)^2}{c^2}} = 0.8\text{m}$$

在其他方向, 长度仍为  $1\text{m}$ 。

2. 在惯性系  $S$  中, 有事件 1 和事件 2 的空间间隔和时间间隔分别是  $x_2 - x_1 = 600\text{m}$ ,  $t_2 - t_1 = 8 \times 10^{-7}\text{s}$ , 为使这两事件对惯性系  $S'$  是同时发生的, 那么  $S'$  系相对  $S$  系沿在  $x$  方向的运动速度应为多少?

解: 在  $S$  系中,  $\Delta t = t_2 - t_1 = 8 \times 10^{-7}\text{s}$ ,  $\Delta x = x_2 - x_1 = 600\text{m}$ , 由洛伦兹变换可知

$$\Delta t' = \frac{\Delta t - \frac{u}{c^2} \Delta x}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

为使这两事件对惯性系  $S'$  是同时发生的，则需要  $\Delta t'=0$ ，则：

$$u = \frac{\Delta t}{\Delta x} c^2$$

求解得  $u=1.2 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

3. 一艘飞船以  $0.8c$  的速度飞离地球，某一时刻飞船上向地球发射的电磁信号，在  $60\text{s}$  之后飞船接收到了从地球反射回来的电磁信号。试求：（1）在电磁信号到达地球的时刻，在飞船上测得地球与飞船间的距离为多少？（2）当飞船接收到反射信号时，在地球上测得的飞船与地球的距离为多少？

解：（1）在飞船上测量，电磁信号到达地球又反射回来，来回光路相等。光速相等，分别用时  $30\text{s}$ ，所以地球反射信号时，地球离飞船的距离为

$$c \times 30 = 9 \times 10^9 \text{ m/s}$$

（2）在飞船上测量，当宇航员发射信号时，它离地球距离为

$$l' = c \times 30 - 0.8c \times 30 = 6c$$

在地球上测量，在宇航员发射信号时，它离地球的距离为

$$l = \frac{l'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{6c}{\sqrt{1 - \frac{0.8c^2}{c^2}}} = 10c$$

宇航员从发射到接收电磁信号，他自己的时钟经过了  $\Delta t'=60\text{s}$ ，为固有时间，在地球上测量该时间间隔为

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \frac{60}{\sqrt{1 - \frac{0.8c^2}{c^2}}} = 100 \text{ s}$$

这段时间内，在原来离地球  $10c$  基础上，飞船又继续向前飞了  $l_1$  的距离

$$l_1 = u \Delta t = 0.8c \times 100 = 80c$$

因此，在地球上测量，宇航员接收反射信号时，飞船离地球的距离为

$$l + l_1 = 10c + 80c = 90c = 2.7 \times 10^{10} \text{ m}$$

4.  $\pi$ 介子是不稳定的粒子,在与 $\pi$ 介子相对其静止的参考系中测得它的寿命是  $2.6 \times 10^{-8} \text{s}$ 。如果 $\pi$ 介子相对于实验室以  $0.8c$  的速率运动,试求:(1)在实验室参考系中, $\pi$ 介子的寿命是多少?(2)在 $\pi$ 介子寿命时间内,它飞行的距离是多少?

解:(1)已知 $\pi$ 介子的固有寿命  $T = 2.6 \times 10^{-8} \text{s}$ ,按相对论理论,实验室参考系中测得 $\pi$ 介子的寿命为

$$T' = \gamma T = \frac{T}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} = \frac{2.6 \times 10^{-8}}{\sqrt{1 - 0.8^2}} = 4.33 \times 10^{-8} \quad (\text{s})$$

(2)  $\pi$ 介子的飞行距离为

$$s' = uT' = 0.8 \times 3 \times 10^8 \times 4.33 \times 10^{-8} = 10.4 \quad (\text{m})$$

5. 某粒子的静止质量  $m_0$  为  $9.11 \times 10^{-31} \text{kg}$ 、运动速率为  $0.99c$ 。试求:(1)该粒子的总能量是多少?(2)该粒子的动能是多少?其动能与该粒子的经典力学动能相比,是大还是小?

解:(1)由相对论质能关系,该粒子的总能量为

$$\begin{aligned} E &= mc^2 = \gamma m_0 c^2 \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - 0.99^2}} \times 9.11 \times 10^{-31} \times (3 \times 10^8)^2 = 5.81 \times 10^{-13} \quad (\text{J}) \end{aligned}$$

(2) 相对论理论,其动能为

$$E_k = E - E_0 = mc^2 - m_0 c^2 = (\gamma - 1)m_0 c^2 = 5.0 \times 10^{-13} \text{ J}$$

其中,  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - 0.99^2}} = 7.09$

按经典理论,该粒子动能为  $E_{k0} = \frac{1}{2} m_0 v^2$

$$\text{二者之比, } \frac{E_{k0}}{E_k} = \frac{\frac{1}{2} m_0 v^2}{(\gamma - 1)m_0 c^2} = \frac{v^2}{2(\gamma - 1)c^2} = \frac{0.99^2}{2 \times 6.09} = 0.0806$$

因此,相对论动能大于经典力学的动能。

6. 在正负电子对撞实验中,电子被加速后具有  $3.0 \times 10^9 \text{ eV}$  的能量,试求:此时电子质量是其静止质量的多少倍?

解:由质能方程  $E = mc^2$  和  $E_0 = m_0 c^2$ ,

可得电子的动质量与静质量之比  $m/m_0 = E/E_0 = E/m_0c^2 = 5.86 \times 10^3$ 。

7. 如果通过外力作用使质子的速度从  $v_1 = 1.0 \times 10^7 \text{ m/s}$  增加到  $v_2 = 2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，外力对它作的功是多少？(质子静止质量  $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ )

解：质子速度为  $v_1 = 1.0 \times 10^7 \text{ m/s}$  时总能量为：

$$E_1 = \frac{m_p c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_1^2}{c^2}}} = \frac{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{\sqrt{1 - \frac{(1.0 \times 10^7 \text{ m/s})^2}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}}} = 1.502 \times 10^{-10} \text{ J}$$

质子速度为  $v_2 = 2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$  时总能量为：

$$E_2 = \frac{m_p c^2}{\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}}} = \frac{1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{\sqrt{1 - \frac{(2.0 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}}} = 2.016 \times 10^{-10} \text{ J}$$

则施加外力使质子的速度从  $v_1 = 1.0 \times 10^7 \text{ m/s}$  增加到  $v_2 = 2.0 \times 10^8 \text{ m/s}$  外力必须对它作的功为

$$W = E_2 - E_1 = 2.016 \times 10^{-10} \text{ J} - 1.502 \times 10^{-10} \text{ J} = 5.14 \times 10^{-11} \text{ J}$$

8. 半人马星座  $\alpha$  星是距离太阳系最近的恒星，它到地球的距离是  $4.3 \times 10^{16} \text{ m}$ 。

假设一宇宙飞船从地球飞到  $\alpha$  星，飞船相对于地球的速度为  $v = 0.99c$ 。以地球上的时钟计算，飞船需要用多少年时间才能到达该星？以飞船上的时钟计算，飞船又需多少年时间？

解：以地球上的时钟计算，需要的时间为

$$t_1 = \frac{l}{v} = \frac{4.3 \times 10^{16} \text{ m}}{0.99 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1.44781145 \times 10^8 \text{ s} = 4.59098 \text{ 年即 } 1676 \text{ 天}$$

如果以飞船为参考系，地球到  $\alpha$  星的距离变为

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 4.3 \times 10^{16} \text{ m} \times \sqrt{1 - \frac{(0.99c)^2}{c^2}} = 6.066 \times 10^{15} \text{ m}$$

则以飞船上的时钟计算，需要的时间为

$$t_1 = \frac{6.066 \times 10^{15} \text{ m}}{0.99 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2.04242424 \times 10^7 \text{ s} = 236.3 \text{ 天} = 0.647 \text{ 年}$$

### 三、开放性习题

爱因斯坦于 1905 年创立了狭义相对论，1907 年又提出了广义相对论基本原理，1916 年发表的《广义相对论的基础》一文，标志着广义相对论的诞生。从狭义相对论到广义相对论，人们的时空观将发生怎样的变化？广义相对论又是怎样使人类对宇宙认识的进了一大步的？从牛顿力学到狭义相对论、再到广义相对论的物理发展史，给了人们怎样的启示？

#### 习题指导与参考答案：

本题目的在于引导学生理解物理理论建立与科学观点形成的关联，形成用发展的观点来看待问题的思维方式，同时让学生了解物理学发展对科学发展和社会发展的贡献，领略物理学之美。

爱因斯坦在《广义相对论的基础》一文中，评述了狭义相对论，并表述了广义相对性原理——物理学定律必须对于无论哪种方式运动着的参考系都成立。

(1) 广义相对论从两个方面发展了狭义相对论：一是在狭义相对性原理基础上，将物理定律从“惯性系”推广到“任何参考系”，即提出了广义相对性原理，认为物理定律在任意参照系下都具有相同的形式；二是研究了引力问题，认为引力质量和惯性质量是等价的，并得出引力的本质是时空的弯曲。因此，广义相对论的时空观为：空间和时间会发生弯曲，引力场实际上是一个弯曲的时空。而狭义相对论的时空观为：空间和时间具有相对性，且相互关联，时空是平直的三维时空。

(2) 广义相对论使人们有了弯曲时空的概念，知道一个超大质量的物体可使空间凹陷，从而发现了黑洞。广义相对论还预言了光线偏折、引力红移、引力时间膨胀效应、引力波等的存在，这些都逐一被证实。广义相对论带来的这些新发现让人们对于宇宙的认识前进了一大步。

(3) “光速不变”让经典牛顿力学遇到难题，于是建立了狭义相对论使问题得以解决，使人们把对运动的研究从低速运动扩展到了近光速及光速的范围。狭义相对论中引入了“惯性系”，但这成了该理论的基础缺陷，因为物理学家们无法说明同一物理现象对惯性系和非惯性系为什么会有不同，因此爱因斯坦直接删掉了“惯性系”这一定义，把狭义相对论原理扩大到任何参考系，建立了广义相

---

对论。由此可见，物理学理论的建立是一个不断解决问题、不断自我修正并不断发展的过程，也是一代又一代物理学家敢于直面问题、不墨守成规、勇于推陈出新的过程，更是物理学不断推动人们认识进步、促进人类社会发展的过程。

成都信息工程大学



---

## 第四章 气体动理论

### 一、分析题

1. 根据气体压强公式分析：为什么不能将密封瓶罐装的食物和带壳的生鸡蛋放在微波炉中加热？

答：加热封闭罐装食物或带壳生鸡蛋后，温度升高，气体分子动能增加，会导致内部压强过大而发生爆炸。

2. 在一定温度下处于热平衡状态的气体分子，为什么它们的平均速度大于零而平均速率却等于零呢？

答：（1）气体分子的平均速率速率为所有气体分子速率的代数和与气体分子数的比值，而气体速率为标量，因此其平均速率大于零。（2）而热平衡状态下气体分子沿着空间各个方向的运动概率相等，且气体分子的速度在各个方向上分量的统计平均值相等，因此气体的平均速度为零。

3. 在一定温度下，气体中的每一个气体分子都具有动能，温度公式也给出了每个分子的平均动能和理想气体温度之间的关系。那么气体有温度，单个的气体分子有温度吗？为什么？单个气体分子与气体系统的关系是怎样的呢？

答：无，温度是大量分子热运动的统计平均结果，对单个分子而言温度是无意义的。气体系统温度越高，单个气体分子的平均平动动能越大，气体分子热运动越剧烈。

4. 当理想气体的温度从  $50^{\circ}\text{C}$  增加到  $100^{\circ}\text{C}$  时，气体分子的平均平动动能是否也会增加一倍呢？

答：不会，理想气体温度公式中的温度为绝对温度，温度从  $50^{\circ}\text{C}$  增加到  $100^{\circ}\text{C}$  时其对应的绝对温度并没有增加一倍。

5. 如果氦（He）容器中的原子与氩（Ar）容器中的原子具有相同的平动速度，且把它们都当视为理想气体，那么哪种气体的温度更高？

答：氩气温度更高，因为氩气原子量大于氦气。

6. 一杯啤酒中的气泡，为什么在上升过程中会逐渐变大？

答：气泡在上升过程中其所受液体压强减小，根据理想气体状态方程可知其体积增大。

7. 假设空气中水分子的速率类似麦克斯韦速率分布律，试分析夏季多雨的原因？

答：当温度升高后，水分子速率分布曲线的峰值右移，平均速度增大，导致能够逃逸的水分子增多，从而容易形成云和雨。

8. 在某些密封食品的包装袋上有“如有胀包，请勿食用”的提示，为什么这些食品需要这样的提示？若此类食品被带到高原，包装袋也会膨胀甚至胀裂，这时食品可以食用吗？请解释原因。

答：（1）正常情况下食品包装涨袋是因为食物变质导致。（2）而在高原由于海拔高度的增大，导致大气压强减小，食品包装袋会出现涨袋现象，并非食物变质，因此可以食用。

## 二、综合题

1. 最好的真空实验室具有 $1.00 \times 10^{-13} \text{ Pa}$ 的压强。当温度为 $25^\circ \text{C}$ 时，在这样的实验室中每立方米有多少气体分子？

解：根据理想气体压强公式

$$p = \frac{2}{3} n \overline{\varepsilon_k}$$

理想气体温度公式

$$\overline{\varepsilon_k} = \frac{3}{2} kT$$

可得

$$p = nkT$$

因此实验室中每立方米气体分子个数为

$$n = \frac{p}{kT} = \frac{1.0 \times 10^{-13}}{1.38 \times 10^{-23} \times (25 + 273.15)} = 2.43 \times 10^9 \text{ m}^{-3}$$

2. 汽车轮胎体积为  $1.60 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ ，当温度为  $0^\circ\text{C}$  时，轮胎内空气的压强为  $2.6 \times 10^5 \text{ Pa}$ ；当温度上升至  $25^\circ\text{C}$  时，轮胎的体积增加到  $1.65 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ ，此时轮胎内空气的压强为多少？

解：根据玻—马定律  $pV=C$  和查理定律  $\frac{p}{T}=C$  可得

$$\frac{pV}{T}=C$$

（设  $0^\circ\text{C}$  气体压强为  $p_0$ 、体积为  $V_0$ 、温度为  $T_0$ ， $25^\circ\text{C}$  度时压强为  $p_1$ 、体积为  $V_1$ ，温度为  $T_1$ ）

$$\text{则：} \frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_1 V_1}{T_1}$$

$$\begin{aligned}\text{即：} p_1 &= \frac{p_0 V_0 T_1}{T_0 V_1} = \frac{2.6 \times 10^5 \times 1.6 \times (273.15 + 25)}{273.15 \times 1.65 \times 10^{-2}} \text{ Pa} \\ &= 2.75 \times 10^5 \text{ Pa}\end{aligned}$$

3. 汽车发动机把  $V_i = 4.5 \times 10^{-2} \text{ m}^3$  的空气吸进气缸，温度为  $30^\circ\text{C}$ ，压强为一个大气压，接着活塞把空气压缩至原体积的  $1/9$  ( $0.111V_i$ )、原压强的  $20$  倍 ( $20P_i$ )。试求：气缸中空气被压缩前后温度的变化。

解：根据理想气体定律，对于一定量的理想气体  $\frac{PV}{T}=C$

空气被压缩前的压强为  $P_i = 1 \text{ atm} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，体积为  $V_i = 4.5 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ ，温度为  $T_i = 30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$ ；空气被压缩后的压强为  $P = 20P_i = 2.02 \times 10^6 \text{ Pa}$ ，体积为  $V = 0.111V_i = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。

带入上式可得：

$$T = \frac{PV}{P_i V_i} T_i = 673 \text{ K} = 400^\circ\text{C}$$

故前后温度变化为  $T - T_i = 370^\circ\text{C}$ 。

4. 一位跳水运动员从 5.0m 深的水底迅速升到水面。如果他在上升前没有排出肺中的气体，那么上升到水面后他的肺会膨胀到多少倍？设运动员上升过程中温度不变，肺中压强与身体周围压强相同，海水密度为  $1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

解：设与运动员在水底时肺中气体体积为  $V_0$ ，标准大气压强为  $P_0$ ，则运动员在水底时所受压强为：

$$P = P_0 + \rho_{\text{海水}} gh$$

运动员上升到水面后体积为  $V'$ ，根据理想气体定律  $P_0 V' = P V_0$

故

$$\frac{V'}{V} = \frac{P}{P_0} = \frac{1 + \rho_{\text{海水}} gh}{P_0}$$

带入数值计算可得  $\frac{V'}{V} = 1.5$ 。

上升到水面后运动员的肺会膨胀到水底时的 1.5 倍。

5. 一位肺气肿患者通过面罩呼吸氧气，氧气瓶可容纳压强为 15.2MPa 的  $\text{O}_2$  气  $0.017 \text{ m}^3$ 。试求：（1）在一个大气压下，这些  $\text{O}_2$  将占据的体积（温度不变）；（2）如果患者在一个大气压下以  $8.0 \text{ L/min}$  吸入  $\text{O}_2$ ，该气瓶内氧气可以持续使用多长时间？

解：根据理想气体定律，对于一定量的理想气体在等温条件下  $PV = C$

（1）在一个大气压下， $\text{O}_2$  将占据的体积

$$V = \frac{15.2 \times 10^6 \times 0.017}{1.013 \times 10^5} \text{ m}^3 = 2.55 \text{ m}^3$$

（2）该气瓶内氧气可以持续使用时间为

$$t = \frac{2.55 \times 10^3}{8.0} \text{ min} = 319 \text{ min} = 5.3 \text{ 小时}$$

6. 一个体积为  $1.0 \text{ cm}^3$  的气泡在 20.0m 深的湖底形成，湖底温度为  $10.0^\circ\text{C}$ 。气泡上升到湖面，湖面水温为  $25.0^\circ\text{C}$ ，假设气泡足够小，其温度总是与周围温度相同。请问：若忽略水面表面张力，在气泡冲破湖面前的瞬间，气泡体积是多少？

解：假设气泡在湖底时的压强为  $P_0$ 、体积为  $V_0$ 、温度为  $T_0$ ；在湖面时压强为  $P'$ 、体积为  $V'$ 、温度为  $T'$ 。

气泡在湖底时的压强  $P_0 = P' + \rho_{\text{水}}gh$ ，根据理想气体状态方程  $\frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{P' V'}{T'}$

因此

$$V' = \frac{P_0 V_0 T'}{T_0 P'}$$

带入数值可得  $V' = 3.1 \text{ cm}^3$

7. 假设一个人在冬天深吸一口气，吸入了温度为  $-10^\circ\text{C}$ 、体积为  $0.05\text{L}$  的空气，进入人体肺中的温度升为  $37^\circ\text{C}$ 。若外界压强为  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，空气当作理想气体。试问：人吸入的空气，在进入人体前后的平动动能的变化是多少？

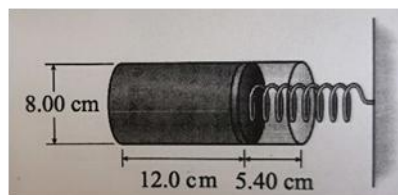
解：平动动能的变化为  $\Delta \overline{\varepsilon_k} = \frac{3}{2} \mu R \Delta T$ ，根据理想气体状态方程  $PV = \mu RT$ ，可得  $\mu R = \frac{PV}{T}$ 。故  $\Delta \overline{\varepsilon_k} = \frac{3}{2} \frac{PV}{T} \Delta T = 13.5 \text{ J}$

8. 人的肺泡平均直径为  $0.125\text{mm}$ ，近似为球形。如果肺泡囊内的压强为  $1.00 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，温度为  $310\text{K}$ （即平均体温），那么一个肺泡内有多少个空气分子？

解：根据理想气体状态方程  $PV = \mu RT$ ，可得  $\mu = \frac{PV}{TR}$ ；

肺泡内空气分子数  $N = \mu N_A = 2.4 \times 10^{13}$  个。

9. 如习题图 4-1 所示，一个圆柱形气室长为  $12.0\text{cm}$ ，一端有一个直径为  $8.00\text{cm}$  的活塞，活塞链接一个理想弹簧。开始时刻，气室内气体处于一个大气压和  $20.0^\circ\text{C}$ ，弹簧没有被压缩。当总量为  $6.50 \times 10^{-2} \text{ mol}$  的气体加入气室后，弹簧被压缩  $5.40\text{cm}$  的长度。试求：弹簧的倔强系数。



习题图 4-1

解：假设初始状态时气体摩尔量为  $\mu_0$ ，压强为  $P_0$ 、体积为  $V_0$ 、温度为  $T_0$ ；加入气体后气体摩尔量为  $\mu'$ ，压强为  $P'$ 、体积为  $V'$ 、温度为  $T'$ 。

根据理想气体状态方程  $PV = \mu RT$ ，可得  $\mu_0 = \frac{P_0 V_0}{T_0 R} = 2.5 \times 10^{-2} \text{ mol}$ ；

加入气体后，根据理想气体状态方程  $P'V' = \mu' RT_0$ ，可得

$$P' = \frac{\mu' RT_0}{V'} = 2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$$

因此，加入气体后，根据受力平衡与胡克定律  $k\Delta x + P_0 S = P' S$ ，故

$$k = \frac{(P' - P_0) S}{\Delta x} = 1.4 \times 10^4 \text{ N / m}$$

10. 金星大气层顶部附近的温度是 240K，（1）试计算金星大气层顶部氢气和二氧化碳的方均根速率；（2）研究发现，当气体分子方均根速率超过地球上逃逸速度的 1/6 时，气体将逃逸出大气层并进入外层空间，如果金星上的逃逸速度是 10.3km/s，那么氢气和二氧化碳气体能逃逸出来吗？

解（1）氢气分子和二氧化碳分子的方均根速率为

氢气：

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M_{H_2}}} = \sqrt{\frac{3 \times 8.31 \times 240}{2 \times 10^{-3}}} \text{ m/s} = 1.72 \text{ km/s}$$

二氧化碳：

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M_{CO_2}}} = \sqrt{\frac{3 \times 8.31 \times 240}{44 \times 10^{-3}}} \text{ m/s} = 0.35 \text{ km/s}$$

（2）金星上逃逸速度的 1/6 是 1.72km/s，因此氢气可以逃出，而二氧化碳不能逃逸出金星。

11. 一个密封罐内存有压强为 2.0atm 的理想气体，其分子的方均根速率  $v_{\text{rms}}$  为  $v_0$ 。如果  $v_{\text{rms}}$  速率减小为  $0.90v_0$ ，那么气体压强将变为多少？

解：根据初始状态下气体方均根速率  $v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT_0}{M}} = v_0$ ，可得

$$T_0 = \frac{v_0^2 M}{3R}$$

当方均根速率减小后  $v_{\text{rms}}' = \sqrt{\frac{3RT'}{M}} = 0.9v_0$ ，可得

$$T' = \frac{0.81v_0^2 M}{3R}$$

根据理想气体状态方程在等体状态下  $\frac{P_0}{T_0} = \frac{P'}{T'}$ ，即

$$P' = \frac{P_0 T'}{T_0} = 0.81P_0 = 1.62\text{atm}$$

### 三、开放性习题

请根据自己所在班级最近一次物理考试成绩，计算这次考试成绩的平均值、最概然值和方均根值，并说明这几个成绩所代表的同学们学习状况。

#### 习题指导与参考答案：

本题目的在于将热力学基本理论用于解决实际问题，让学生通过对具体事件的分析，加深对三种分子特征速率的理解。

(1) 以某班某次学生实际考试成绩为例做出成绩分布曲线，横坐标为考试分数、纵坐标为不同分数的学生的比例，并分析考试成绩分布曲线中大致的分布规律，正常情况下应该成正态分布或接近正态分布。

(2) 根据分子运动三种特征速率的计算方式来计算学生平均成绩、最概然成绩及成绩方均根。平均成绩  $\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^N s_i}{N}$ ，应该代表这个班这次考试体现的学生平均水平。最概然成绩应该成绩分布曲线的极大值，代表人数最多的考试分数。学生成绩方均根  $s_{\text{rms}} = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{N}}$ ，代表了学生成绩的离散程度，某一学生成绩越接近全班平均成绩，其离散程度越小。根据计算结果，分析一下 3 个不同成绩的关系，是否与气体分子运动三个速率的关系一致，并尝试着解释一下原因。

---

## 第五章 热力学基础

### 一、分析题

1. 在体积不变的情况下, 一定量理想气体的温度从  $25^{\circ}\text{C}$  升高到  $50^{\circ}\text{C}$ , 那么气体压强是否也增加到原先的 2 倍? 为什么?

答: 否。根据式  $pV = \mu RT$ ,  $T$  为绝对温度,  $25^{\circ}\text{C}$  和  $50^{\circ}\text{C}$  的绝对温度为  $298.15\text{ K}$  和  $323.15\text{ K}$ , 因此在体积不变的情况下气体压强并未增加到原来的 2 倍。

2. 设分子只有转动, 一定量的双原子分子的理想气体在等体过程和等压过程中都以热量形式损失了能量  $Q$ , 在哪一个过程中气体内能减少的更多?

答: 等体过程。在等体过程中损失的能量  $Q$  全部来自于内能的减少, 而在等压过程中损失的能量  $Q$  一部分来自于内能减少, 另一部分来自于气体对外做的负功, 因此在等体过程中内能减少更多。

3. 是否可以制成一部热机, 它能在水的沸点和冰点间工作, 且效率达 70%, 为什么?

答: 不能。在水的沸点和冰点间工作的卡诺热机的效率为 26.8%, 因此, 根据卡诺定理, 在水的沸点和冰点间工作的热机效率达不到 70%。

4. 把封闭在一个绝热气缸中的气体, 压缩到它体积的一半。在这个过程中, 气体的熵是增加、减小还是不变?

答: 不变。根据熵的定义, 在封闭的绝热气缸中气体体积减小的过程中吸收的热量为 0, 因此气体的熵不变。

5. 如果你将厨房的冰箱门打开几个小时, 厨房的温度是升高、降低还是不变? 假设厨房是封闭的。

答: 升高。在封闭的厨房中冰箱消耗的电能以热量的形式传递到厨房中, 所以厨房的温度升高。

6. 目前家用空调都有辅助电加热器, 在室外温度相对温和时, 不用电加热器。但是, 当室外温度很低时, 就用电加热器作为空调制热的补充, 为什么?



---

答：根据逆循环过程的制冷系数定义式，当室外温度很低时，其制冷系数大幅度降低而使制热效果变差。

7. 一位工程师设计了一艘轮船，想以下方式获得动力：海水温度始终为  $17^{\circ}\text{C}$ ，发动机吸入海水，获取海水的部分内能，导致海水的温度降低至  $14.5^{\circ}\text{C}$ ，然后将其排放到海中。请问，这艘轮船的发动机是一台热机吗？这位工程师对发动机的设计可行吗？

答：是。不可行，因为此热机的最大循环效率仅为  $0.86\%$ ，不能正常工作。

8. 人在进行剧烈运动时，人体通过各种动作来做功，同时身体通过皮肤有向外传递热量。请根据热力学第一定律，分析人在运动过程中体温的变化。人体在运动过程中会出现体温降低的情况吗？请说明原因。

答：（1）人在运动过程中肌肉不断地收缩舒张来对外做功，并产生热量，因此人在运动过程中身体温度会升高。

（2）不会，正常情况下人体通过摄入食物而吸收的热量和对外做的功相当，人体的内能不会减小。

9. 汽车发动机在工作过程中，高温热源是燃烧的汽油（约  $630^{\circ}\text{C}$ ），低温热源是排放的废气（约  $140^{\circ}\text{C}$ ），环境温度远低于汽车废气温度。请问：可否利用汽车废气与环境温度的差异，制造第二个引擎来驱动汽车，增加汽车单位油耗下的行驶里程，这样可以减少多少能耗？若能制造出汽车的第二引擎，请比较第一、第二引擎的热机效率。

答：（1）可以；（2）第一引擎效率为  $54.25\%$ ；第二引擎效率为  $27.8\%$ （室温为  $25^{\circ}\text{C}$ ）

10. 若把一桶海水中的水蒸发后，将剩下一些盐晶体，盐晶体分子排列的有序性比海水中溶解的盐分子排列有序性要高。这种盐分子排列的较为无序到较为有序的变化过程，是否违背了熵增原理呢？请说明原因。

答：否，海水中除了盐结晶外，剩余的水由液体蒸发成为气态的过程中无序度增加，导致熵增加。

### 三、综合题

1. 1mol理想气体经历一个等温膨胀过程, 请用初始状态和末状态的体积及温度来表示气体吸收的热量。

解: 设初状态体积为 $V_1$ , 温度为 $T$ , 末状态体积为 $V_2$ , 温度为 $T$ 。

根据热力学第一定律

$$(dQ)_T = dW = pdV$$

由式(5-1)可得气体吸收的热量为

$$Q_T = W = \int_{V_1}^{V_2} RT \frac{dV}{V} = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

2. 当理想气体吸收30J的热量时, 气体的体积从 $40\text{cm}^3$ 变化到 $140\text{cm}^3$ , 压强保持在1个大气压不变。试求气体内能的改变量。

解: 根据热力学第一定律在等压过程中

$$\Delta E = Q - P\Delta V = 30\text{J} - 1 \times 10^5 \times 100 \times 10^{-6} \text{J} = 20\text{J}$$

3. 在恒定压强下, 初始温度为 $25^\circ\text{C}$ 时, 加热1mol氮气, 使其体积增加到原来的两倍, 气体吸收了多少热量(分子只要转动)?

解: 根据物态方程 $pV = \mu RT$ 可得

$$p = \frac{\mu RT}{V} \quad (1)$$

$$\Delta T = \frac{p\Delta V}{\mu R} \quad (2)$$

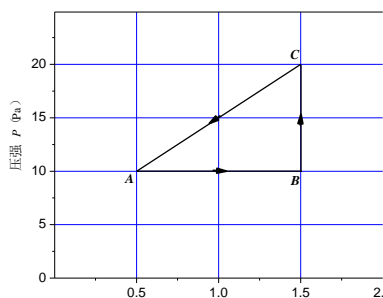
根据热力学第一定律可得

$$Q = \Delta E + p\Delta V = \frac{i}{2} R\Delta T + p\Delta V \quad (3)$$

将(1), (2)代入(3)式可得

$$Q = 2\mu RT = 1 \times 8.31 \times (25 + 273.15) \text{J} = 4.95 \times 10^3 \text{J}$$

4. 如习题图 5-1(a)所示, 一个热力学系统从初态A变化到另一状态B, 再经过状态C又回到状态A。(1)填写习题图 5-1(b)表中每一个热力学量的+或-;  
(2)计算整个循环过程中系统作的功。



习题图 5-1(a)

	$Q$	$W$	$\Delta E$
$A \rightarrow B$	+	+	+
$B \rightarrow C$	+	0	+
$C \rightarrow A$	—	—	—

习题图 5-1(b)

解: (1)  $AB$  过程: 此过程为等压过程气体体积增加, 气体对外做正功  $W > 0$ , 温度升高, 内能增加  $\Delta E > 0$ , 故根据热力学第一定律气体吸收  $Q > 0$ 。

$BC$  过程: 此过程为等体积过程, 压强增加, 温度升高, 气体对外做功为 0, 内能增加即  $E > 0$ , 故根据热力学第一定律吸收热量  $Q > 0$ 。

$CA$  过程: 在此过程中气体体积减小, 对外做负功  $W < 0$ , 温度降低  $E < 0$ , 故根据热力学第一定律气体放出热量  $Q < 0$ 。

(2) 整个循环过程中对系统外做的净功应等于循环曲线所包围的面积

$$W = -\frac{1}{2}(p_C - p_A)(V_B - V_A) = -\frac{1}{2} \times 10 \times 1 \text{ J} = -5 \text{ J}$$

5. 一卡诺热机在温度为 1000K 和 300K 两个热源之间工作, 如果 (1) 将高温热源  $T_1$  提高到 1100K; (2) 将低温热源温度降低到  $T_2 = 200\text{K}$ , 求两种方案下的热机的效率, 并分析在实际应用中哪一种方案更好。

解: 根据卡诺热机的循环效率, 可得此热机的效率:

$$\eta_0 = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{1000} = 70\%$$

(1) 若高温热源提高到 1100K, 热机效率为:

$$\eta_1 = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{300}{1100} = 73\%$$

(2) 若将低温热源降低到 200K, 热机的效率为

$$\eta_2 = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{200}{1000} = 80\%$$

从上述结果中可以看出  $\eta_2 > \eta_1$ , 因此在实际应用中采取第二种方法好。

6. 地面有一容器装有温度为质量为 5.0kg、22℃ 的水, 若将温度为质量为 1.4kg、22℃ 的水, 从 2.5m 的高度倒入该容器中, 试求: (1) 该容器中容纳的 6.4kg 水的内能增加了多少? (2) 容器的水温会升高吗? 请说明原因。

解: (1) 内能增加量  $\Delta E = mgh = 34.3\text{J}$

(2) 会升高。在此过程中, 重力做正功而转化为容器中水的内能, 内能增加使水分子平均动能增加, 所以温度会轻微升高。

7. 在寒冷的冬天, 人们经常搓手取暖。一个人用 5.0N 的力把双手压在一起, 每次来回搓动双手移动的距离为 16cm, 手的滑动摩擦系数是 0.45。假设没有热量释放到周围环境, 试问: 此人来回搓手 8 次后, 双手的内能增加多少?

解: 双手搓动时的摩擦力为

$$f = \mu N = 2.25\text{N}$$

此人来回搓手 8 次后, 双手的内能增加为

$$\Delta E = \Delta W = f \times 16 \times 10^{-2} \times 8\text{J} = 2.88\text{J}$$

8. 如习题图 5-2 所示, 一位工人用浆叶搅拌器搅拌一桶涂料。搅拌桨以 28.0rad/s 的角速度旋转, 对涂料施加 16.0N·m 的力矩, 因此, 搅拌桨做功的功率为 448W。涂料内能增加 12.5kJ, 将引起温度升高 1.0K。试求: (1) 如果涂料与周围环境之间没有热量交换, 当搅拌桨搅拌涂料 5.0min 后, 涂料温度变化为多少? (2) 如果涂



习题图 5-2

料的实际温度变化为 6.3K，那么涂料释放到环境中的热量是多少？

解：（1）搅拌涂料 5.0min 后涂料内能增加为  $\Delta E = 448 \times 5 \times 60 \text{J} = 134.4 \text{kJ}$

因此涂料温度变化  $\Delta T = \frac{\Delta E}{12.5 \times 10^3} \text{K} = 10.8 \text{K}$

（2）如果涂料的实际温度变化为 6.3K，则内能变化

$$\Delta E' = 12.5 \times 6.3 \text{kJ} = 78.75 \text{kJ}$$

故，释放到环境中的热量为

$$\Delta Q = 134.4 - 78.75 \text{kJ} = 55.7 \text{kJ}$$

9. 一座发电厂能产生  $500^\circ\text{C}$  的蒸汽，并利用  $27^\circ\text{C}$  的河水进行冷却。如果蒸汽冷却改用温度为  $47^\circ\text{C}$  的冷却塔，那么在理论上蒸汽冷却的最高效率降低多少？

解：用河水冷却蒸汽时理论上冷却的最高效率为

$$\eta_1 = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{273 + 27}{273 + 500} = 61.2\%$$

用冷却塔冷却蒸汽时理论上冷却的最高效率为

$$\eta_2 = 1 - \frac{T'_1}{T_2} = 1 - \frac{273 + 47}{273 + 500} = 58.6\%$$

因此，理论上蒸汽冷却的最高效率降低  $\Delta\eta_2 = \eta_1 - \eta_2 = 2.6\%$

10. 一条鱼处于  $1.1 \text{atm}$  的压强下，体内鱼鳔的初始体积为  $8.16 \text{ml}$ 。这条鱼在水面内游动起来，用力游动使体温从  $20.0^\circ\text{C}$  升高到  $22.0^\circ\text{C}$ 。试求：（1）如果鱼所处的压强不变，鱼鳔的体积将增加多少？（2）鱼鳔中的空气获得了多少热量？设空气为双原子分子理想气体。

解：假设鱼在体温增加前压强为  $P_0$ 、体积为  $V_0$ 、温度为  $T_0$ ；体温增加后体积为  $V'$ 、温度为  $T'$ 。

（1）根据等压状态下理想气体状态方程可得  $\frac{V_0}{T_0} = \frac{V'}{T'}$ ，故  $V' = \frac{V_0 T'}{T_0}$

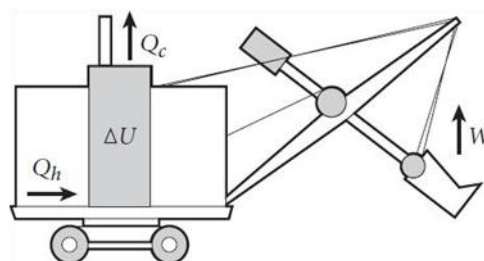
$$\Delta V = V' - V_0 = \left(\frac{T'}{T_0} - 1\right)V_0 = 0.056\text{ml}$$

因此，鱼鳔的体积将增加

(2) 鱼鳔中的空气获得的热量为

$$\Delta Q = \Delta E + P\Delta V = \frac{5}{2} \frac{P_0 V_0}{T_0} \Delta T + P_0 \Delta V = 22\text{mJ}$$

11. 一台蒸汽铲车将 450.0 kg 的泥土垂直提升 8.6m，蒸汽发动机为铲车提供了  $2.00 \times 10^5 \text{ J}$  的热量，如习题图 5-3。试求：(1) 蒸汽铲在搬运泥土中做了多少功？(2) 蒸汽铲的效率是多少？(3) 假设蒸汽铲引擎的内部能量不变，那么铲子作了多少无用功？



习题图 5-3

解：(1) 蒸汽铲在搬运泥土中克服重力做功为  $\Delta W = mgh = 3.8 \times 10^4 \text{ J}$

因此蒸汽铲在搬运泥土中做功为  $W = Q - \Delta W = 1.62 \times 10^5 \text{ J}$

$$\eta_1 = \frac{W_1}{Q} = 81\%$$

(2) 蒸汽铲的效率为

(3) 假设蒸汽铲引擎的内部能量不变，铲子作的无用功为克服重力做功。

故铲子做的无用功为  $3.8 \times 10^4 \text{ J}$

#### 四、开放性习题

雾的本质是水汽凝结物，当空气温度达到或相当接近露点，空气中的水汽就会凝结而形成雾。请利用身边的条件、原料及器材实现人工造雾，并用热力学定律分析造雾过程。

#### 习题指导与参考答案：

本题目的在于锻炼学生的动手能力和思考能力，借助“人工造雾”现象来理解热力学过程中较为抽象的能量转换关系。

---

① 参考方案：可以通过构造一个近似的等容过程来实现“人工造雾”。例如：用一个塑料瓶、橡胶瓶塞和打气筒来实现这个等容过程。将塑料瓶用橡胶瓶塞塞住，打气筒从塑料瓶底部打气，不断打气使瓶内部气体压强不断增大，气体将膨胀对外做功冲击瓶塞，直至瓶塞被冲出瞬间，瓶内气体喷出而对外做功，根据热力学第一定律  $Q = \Delta E + W$ ，瓶内空气的内能减小、温度迅速降低，使瓶内和瓶口空气中的水蒸气液化，冷凝成小水珠而形成白色的雾。

② 造雾过程的能量转化：气筒打气的机械能转化为瓶内气体内能，瓶内气体内能转化为气体对外界做的功，气体做的功转化为瓶塞及喷出气体的动能。

## 第六章 量子物理

### 一、分析题

1. 你能否举出一些在日常生活中，随着物体温度的升高，其辐射强度最大的波长有所减小的例子？

答：铁被加热后呈暗红色波长较大，随着温度的升高，铁变得越来越明亮呈蓝色波长变短。

2. 当人们观察一个炽热窑炉内的物体，为什么很难分辨物体的形状？

答：物体的形状通常是由其表面反射出来的光线来决定的。在一个窑里，炽热物体的辐射强度远高于反射强度，而辐射强度与物体形状无太大关系，所以强辐射轻度掩盖了物体的发射强度而使物体的形状更难分辨。

3. 所有物体都会辐射能量，但为什么我们在黑暗房间里不能看见所有的物体？

答：黑暗的房间相当于黑体而吸收了物体所辐射的能量而使我们不能看见所有物体。

4. 请判断下面关于光电效应的说法的正误。（A）入射光强度越大，截止频率越高；（B）靶材料的逸出功越大，截止频率越高；（C）入射光的频率越高，被打出电子的最大动能就越大。

答：（A）错误；（B）正确；（C）正确。

根据光电效应方程  $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$ ，可知截止频率  $\nu_0 = \frac{W}{h}$  与入射光强度无关；靶材料的逸出功越大，截止频率越高；入射光的频率越高，被打出电子的最大动能就越大。

5. 用一定频率的光照射金属板，哪一项决定电子是否逸出。（A）光的强度；（B）光照时间；（C）板的面积；（D）板的材料。

答：D

根据光电效应方程  $h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + W$ ，可知截止频率  $\nu_0 = \frac{W}{h}$  只与板的材料有关。



6. 如果在一种金属中观察到了光电效应，那么在相同条件下，能否在另一种金属中也观察到光电效应呢？请解释原因。

答：不一定，因为截止频率与金属材料的种类有关。

7. 光电效应和康普顿效应都是光子和物质原子中的电子相互作用，其区别在哪儿？下面叙述中正确的有哪些：（A）两种效应中的电子和光子组成的体系都服从能量守恒和动量守恒；（B）光电效应是由于电子吸收光子能量产生的，而康普顿效应则是由于电子与光子发生的弹性碰撞产生的；（C）两种效应都相当于电子和光子的弹性碰撞；（D）两种效应都属于电子吸收光子的过程。

答：B

8. 为什么用可见光不能观察到康普顿效应？

答：由于可见光波长较长，光子能量低，光子与电子碰撞后，根据碰撞理论，光子能量损失很小，因而很难观察到康普顿效应。

9. 光子 A 具有的能量为光子 B 的两倍，试问：（1）光子 A 的动量是光子 B 动量的多少倍；（2）光子 A 的波长是光子 B 波长的多少倍。

答：光子所具有的能量  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ ，光子所具有的动量为  $p = mc = \frac{hc}{\lambda}$ 。

由于  $E_A = 2E_B$ ，故光子 A 的动量是光子 B 的动量的 2 倍，光子 A 的波长是光子 B 的波长的 1/2。

10. 电子和质子具有相同的动能，请问哪个的德布罗意波长较大？

答：电子和质子具有相同的动能  $E_{k1} = E_{k2}$ ，故电子和质子的动量为  $p_1 = \sqrt{2m_1E_{k1}}$ ， $p_2 = \sqrt{2m_2E_{k2}}$ 。

又由于物质的德布罗意波  $\lambda = \frac{h}{p}$ ，且  $p_2 > p_1$ ，所以电子波长大于质子波长。

11. 为什么电子显微镜比光学显微镜更适合观察原子大小的微观粒子？

答：相较于可见光波长，电子的波长更短，波动性更明显。

12.在物理量的测量中，测量仪器都存在着一定的测量误差，这导致了物理量测量不精确。那么，能否制作出完全没有误差的测量仪器，来实现绝对精确地进行测量呢？请说明原因。

答：不能，因为物体都具有波粒二象性，满足不确定关系，从本质上存在不确定因素，无论制作出多精密的仪器设备，都不能实现对物理量的绝对精确测量。

13. 一块石头从建筑物的顶部掉了下来。在石头下落的过程中，它的德布罗意波长将如何变化？请解释原因。

答：减小。根据德布罗意关系石头在下落过程中速度增大，德布罗意波长减小。

14.关于不确定关系，以下几种说法正确的有哪些：（A）粒子的动量不确定，但坐标可以被确定；（B）粒子的坐标不确定，但动量可以被确定；（C）粒子的动量和坐标不可能同时确定；（D）不确定关系不仅适用于电子和光子，也适用于其他粒子。

答：C，D

15. 当氢原子从  $n=3$  能级跃迁到  $n=2$  能级时发射出光子 A，从  $n=4$  能级跃迁到  $n=2$  能级时发射出光子 B。试问：在这两种情况下，（1）A 光子与 B 光子哪个波长更大？（2）A 光子与 B 光子哪个能量更大？

答：（1）A；（2）B

16. 在元素的原子光谱中，为什么通常是观察到的发射光谱线比吸收线更多？

答：发射光谱发生在高温下电子由高能级向低能级跃迁，在此情况下电子可以在任意两个能级间跃迁，因此比只能由低能级向高能级跃迁的吸收光谱要多。

## 二、综合题

1. 钾的逸出功为  $2.25\text{eV}$ ，请问：可以使钾产生光电效应的入射光的最大波长。

解：根据光电效应的截止频率  $\nu_0 = \frac{w}{h}$ ，可得

$$w = h\nu_0 = h\frac{c}{\lambda}$$

因此可以使钾产生光电效应的入射光的最大波长为

$$\lambda = \frac{hc}{w} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{2.25 \times 1.6 \times 10^{-19}} \text{m} = 5.525 \times 10^{-7} \text{m} = 552.5 \text{nm}$$

2. 在普通电视机内, 电子被电势差为 30.0kV 的电场加速, 请计算这种电子的德布罗意波长。

解: 电子被加速后所具有的动能为:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = 30.0 \times 10^3 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{J} = 4.8 \times 10^{-15} \text{J}$$

电子的德布罗意波长:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E_k}} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 4.8 \times 10^{-15}}} \text{m} = 7.2 \times 10^{-12} \text{m}$$

3. 试求波长为 1500nm 的红外线光子的能量、动量及质量。

解: 根据能量公式有:  $E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} \times 3.0 \times 10^8 \text{m/s}}{1500 \text{nm}} = 1.326 \times 10^{-19} \text{J};$

根据动量公式有:  $p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}}{1500 \text{nm}} = 4.42 \times 10^{-28} \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1};$

根据质量公式有:  $m = \frac{h}{\lambda c} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}}{1500 \text{nm} \times 3.0 \times 10^8 \text{m/s}} = 1.47 \times 10^{-36} \text{kg}$

4. 已知 $\alpha$ 粒子的静质量为  $6.68 \times 10^{-27} \text{kg}$ , 求速率为 5000km/s 的 $\alpha$ 粒子的德布罗意波长。

解: 根据德布罗意关系有:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}}{6.68 \times 10^{-27} \text{kg} \times 5000 \text{km/s}} = 1.98 \times 10^{-5} \text{nm}$$

5. 一辆 1200kg 的汽车, 通过精确测量测得, 其质心沿某直线方向的位置不确定度为  $1\mu\text{m}$ 。(1) 请计算汽车沿某直线方向速度的不确定度; (2) 不确定关系是不是使人、汽车、飞机等普通物体的位置和速度不能被同时测量呢? 为什么?

解: (1) 由 (6-11) 可得电子动量不确定度为:

$$\Delta P_x \geq \frac{h}{\Delta x} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{1 \times 10^{-6}} \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 6.63 \times 10^{-28} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$\text{故汽车速度不确定度为: } \Delta v_x = \frac{\Delta P_x}{m} = 5.5 \times 10^{-31} \text{ m/s}$$

(2) 不是。人、汽车、飞机等普通物体为宏观物体，而对于宏观物体的位置和速度的不确定度可以忽略。

6. 在波尔氢原子理论中，当电子从量子数  $n_i = 5$  的轨道跃迁到  $n_f = 2$  的轨道上时，对外辐射光的频率是多少？

$$\text{解: } \nu = \frac{c}{\lambda} = cR\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2}\right) = 6.9 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

### 三、开放性习题

1. 扫描电子显微镜是通过电子与物质的相互作用，产生一定的物理信息，通过对这些信息的接受、放大和成像显示，来获测试和观察物体的表面形貌。请分析扫描电子显微镜的测量原理，能否将电子换做光子来实现相同的功能呢？

#### 习题指导与参考答案：

本题目的在于让学生了解量子物理基本理论是如何转变成实用技术的，并能借助已有的物理知识对相关技术进行探索，锻炼学生的工程思维能力。

(1) 工作原理：扫描电子显微镜工作时，将发射一高能电子束，入射到待扫描的样品表面。当高能电子打在样品表面后，将与样品表面发生碰撞作用，从而产生二次电子、俄歇电子、特征 X 射线和连续谱 X 射线、背散射电子、透射电子等，同时还在可见、紫外、红外光区域产生电磁辐射。在这些信号中，二次电子产生的多少与高能电子束入射角有关，即与样品的表面结构有关，而二次电子作用深度越浅，越是粗糙的样品表面信噪比越高，电子产额也越高，因此二次电子成为了样品表面形貌成像的主要信号源。

产生的二级电子由探测体收集，被闪烁器转变为光信号，再经光电倍增管及放大器转变为电信号，此电信号又经视频放大器放大后输送至显像管，在荧光屏上呈现一幅亮暗程度不同的、反映样品表面形貌的二次电子图像。

(2) 在扫描电子显微镜中, 如果将入射高能电子换成光子束, 我们认为不能实现相同功能。首先, 当光子打到样品表面时, 光电效应能否发生取决于入射光子能量与样品材料的逸出功, 这就从理论上决定了使用光子束进行测量的样品极为有限。即使在特定情况下, 光子与样品表面能发生相互作用逸出光电子, 但能否从光电子携带的信息判断出样品表面形貌, 也是一个不确定的问题。其次, 现有光学显微镜基本是利用光的折射、衍射、干涉等现象来成像, 另有一类光子显微镜, 也是在利用光子激发的荧光来成像, 这些光学显微镜都无法达到电子显微镜的分辨率。

2. 20 世纪量子物理诞生以来, 量子领域的诺贝尔物理学奖获得者层出不穷。诺贝尔物理学奖设立, 是为奖励原创性科学发现与科学成就, 奖励在该领域为人类发展和社会进步做出卓越贡献的人, 让科技为人类谋福祉。请调研量子领域诺贝尔物理学奖的颁发情况, 了解量子物理发展简史, 明确量子物理给人类带来的巨大益处, 进而理解科技进步对人类的巨大贡献。

#### 习题指导与参考答案:

本题目的在于让学生通过了解量子领域重大发现及其对科技发展与社会进步的巨大贡献, 理解科学发展与人类进步的关系, 激励同学们要善于观察、善于思考, 要敢于创新、勇于创造。

量子物理诞生以来的相关诺奖、重大发现、主要贡献及重要应用如下表所示:

获奖时间	获奖人	重大发现	主要贡献	重要应用
1906 年	J. J. 汤姆逊	发现了电子	电子的发现打破了“原子是物质结构最小单元”的观念, 揭示了电的本质; 电子是人类发现的第一个基本粒子	该发现使人们对物质世界的认识向前迈出了一大步, 汤姆逊被后人誉为“最先打开通向基本粒子物理学大门的科学家”
1918 年	普朗克	提出了量子化与能量子的概念, 并成功解释了黑体辐射规律	建立了量子物理, 普朗克成为了量子物理创始人	量子物理成为了现代物理学中重要的基础理论, 也是众多现代技术及信息技术诞生与发展的源泉
1921 年	爱因	发现光电效应, 提出光子假说, 并成功解释	光子假说是量子物理早期的又一个量子化规律, 大大推动了	利用光电效应中光电流与入射光强成正比特性, 可以制

	斯坦	了光电效应及其规律	量子理论的发展	造光电转换器,实现光信号与电信号之间的相互转换,这些光电转换器如 <b>光电管</b> 等,广泛应用于光功率测量、光信号记录、电影、电视和自动控制等诸多方面。
1922 年	玻尔	提出了氢原子结构模型,成功解释了氢光谱的规律性	这一开创性工作,为揭示元素周期表的奥秘打下了基础,使化学从定性科学变为定量科学,使物理和化学这两个学科建立在同一基础之上;同时也极大扩展了量子理论的影响,加速了量子理论发展	玻尔作为量子物理学的最有资格的代表,尼尔斯·玻尔对物理学和人类的整个思维领域做出了多次根本性的重大贡献,留下了难以估价的精神遗产。
1925 年	弗兰克与赫兹共同分享	发现电子与原子碰撞规律,并验证能量转变的量子化特性	弗兰克-赫兹实验不仅证实了玻尔提出的原子存在分立能级的假设,而且直接用来测定两个分立能级之间的能量差,在历史上对量子理论的建立有重要意义。	弗兰克-赫兹实验成为玻尔理论中量子化能级的第一个决定性证据
1929 年	德布罗意	提出了微观粒子波动性的物质波理论	指出电子等微观粒子具有波粒二象性	德布罗意假设提出三年以后,美国的戴维逊和盖革、英国的汤姆逊和乔治等,先后通过电子衍射实验证实了电子具有波动性。
1932 年	海森伯	利用矩阵代数,建立了量子理论中的矩阵力学,提出了“不确定原理”这一量子力学的重要原理	海森伯的理论找出了解释微观物理基本过程的最主要的表达方式,矩阵力学标志着量子力学的正式创立	应用海森伯理论发现了氢的同位素
1933 年	薛定谔和狄拉克共同分享	薛定谔建立了量子力学基本方程(薛定谔方程),狄拉克在纯数学物理的基础上建立了相对论性的波动力学方程(狄拉克方程)	薛定谔方程标志着是原子理论中的波动力学的建立,确定出了波函数的变化规律。 狄拉克方程建立了电子有关的理论,预言存在一种新基本粒子(正电子)的存在,几年后在实验上发现了这种粒子。	薛定谔创立波动力学与海森堡创立矩阵力学成为量子力学的“双胞胎”,这些理论成为研究原子、分子等微观粒子的有力工具,奠定了基本粒子相互作用的理论基础。 狄拉克创建的电子相关理论成为研究粒子物理的基础理论。

1945 年	泡利	提出了泡利不相容原理	圆满解决了当时许多有关原子结构的问题，帮助人们正确理解反常塞曼效应、电子壳层元素周期表等物理问题。	为原子物理发展奠定了重要基础
1954 年	玻恩和博特 共同分享	玻恩提出了量子力学波函数的统计解释。 博特发明了符合计数法，用以研究原子核反应和 $\gamma$ 射线	玻恩成为了理论物理学家、量子力学奠基人之一	
1964 年	汤斯、普罗霍罗夫、巴索夫 共同分享	汤斯与普罗霍罗夫分别提出了利用原子和分子的受激辐射原理来产生和放大微波的方法，汤斯发明了微波激光器，巴索夫发明了激光器	他们在量子电子学领域的基础性研究成果，导致了基于激微波、激光原理建造的振荡器和放大器。	
1965 年	施温格、费曼、朝永振一郎 共同分享	他们分别独立地提出了量子电动力学重整化和计算方法	施温格成为了量子电动力学的创始人之一	
1985 年	克利青	从金属-氧化物-半导体场效应晶体管中发现了量子霍尔效应	发现的量子霍尔效应是一个普遍规律，是凝体物理研究最重要的进展之一	
2012 年	阿罗什和维因兰德 共同分享	他们分别独立发现了测量和操控单个量子系统的突破性实验方法	这种不破坏单个量子粒子的实验方法，开辟了量子物理学实验的新纪元	他们的突破性方法，使量子光学朝着基于量子物理学建造一种新型超快计算机迈出了第一步

## 第七章 静电场

### 一、分析题

1. 如果在静电场中作一封闭曲面，曲面内没有净电荷，下面说法哪个正确。

(A) 通过封闭曲面的电场强度通量一定为 0，场强一定为 0；(B) 通过封闭曲面的电场强度通量不一定为 0，场强一定为 0；(C) 通过封闭曲面的电场强度通量一定为 0，场强不一定为 0；(D) 通过封闭曲面的电场强度通量不一定为 0，场强不一定为 0。

答：C

根据高斯定理： $\oint_{S_1} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_s q_i$ ，曲面的电场强度通量只与曲面内的电

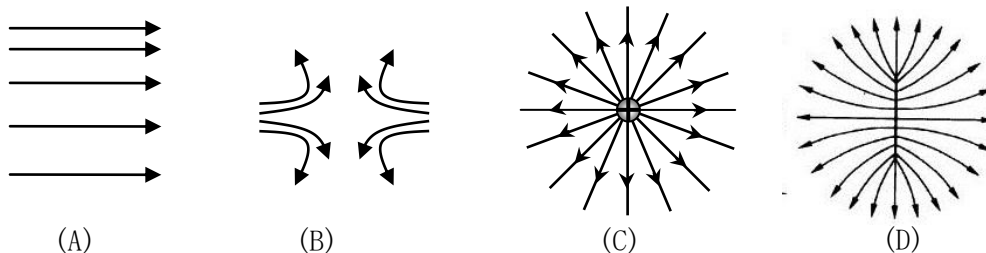
荷有关，曲面上任意一点的电场强度与曲面内外的电荷都有关系。当曲面内没有静电荷时，曲面的电场强度通量一定为 0，但是曲面外部不一定没有电荷，所以曲面上的电场强度不一定为 0。

2. 关于电场线，以下说法哪个正确。(A) 电场线上各点的电场强度大小相等；(B) 电场线是一条曲线，曲线上的每一点的切线方向都与该点的电场强度方向平行；(C) 开始时处于静止的电荷在电场力的作用下运动的轨迹必与一条电场线重合；(D) 在无电荷的电场空间，电场线可以相交。

答：C

电场线上任意点的切线方向为该点处电场强度的方向；电场线密度表征该点处电场强度的大小；电场为有源场，任意电场线不相交；在均匀场中，电场强度处处相等；电荷在均匀电场中静止开始运动，其运动轨迹必沿与一条电场线运动。

3. 请判断习题图 7-1 所示的几种静电场的分布情况，哪些是不可能存在的。



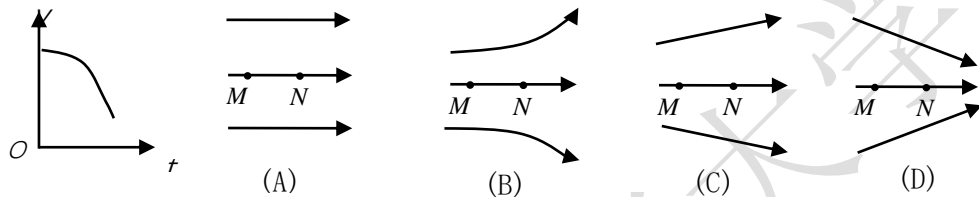
习题图 7-1



答：A，D

均匀电场的电场线均匀分布；电场为有源场；电场中任意电场线不相交；电场线密度表征该点处电场强度的大小。

4.  $M$ 、 $N$  是一条电场线上的两点，一负电荷在电场力作用下，以一定初速度从  $M$  点沿电场线运动到  $N$  点，其速率-时间关系如习题图 7-2 所示，则该电荷所在电场是习题图 7-2 中的哪一种。

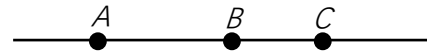


习题图 7-2

答：D

电荷的速度随着时间的增加而减小，说明它作减速运动，所受电场力与运动方向相反；随着时间的增加，速度大小随时间的变化率增加，说明加速度的大小是增大的，因此，它运动方向上电场越来越强。

5. 如习题图 7-3 所示，真空中有三个点电荷  $A$ 、 $B$ 、 $C$  依次排列在同一直线，并处于静止状态。若  $A$ 、 $B$  间距离大于  $B$ 、 $C$  间距离，则以下哪些情况是可以判定的。（A） $A$ 、 $B$ 、



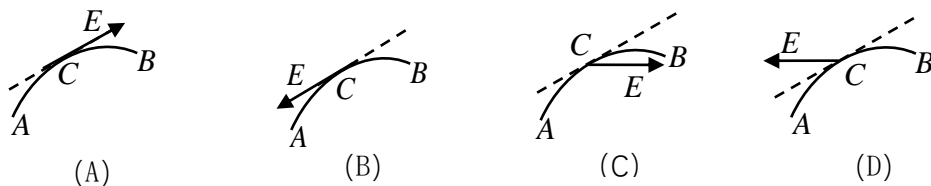
习题图 7-3

$C$  带电的性质；（B） $A$ 、 $B$ 、 $C$  中哪个的电量大；（C） $A$ 、 $B$ 、 $C$  电量的大小。

答：A，B

根据电荷间相互作用力可知： $A$  与  $C$  属于同种电荷， $B$  与它们相反；根据距离，可判断  $Q_A > Q_C > Q_B$ 。

6. 一个负电荷在电场力作用下，从  $A$  点出发经  $C$  点运动到  $B$  点，其运动轨迹如习题图 7-4 所示。已知该电荷速率是逐渐递增的，则关于  $C$  点电场强度方向的图示哪个是正确的。

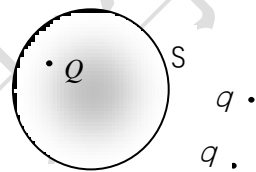


习题图 7-4

答：D

电荷作曲线运动，加速度方向指向曲线凹面处，负电荷所受电场力与电场方向反向。

7. 如习题图 7-5 所示，点电荷  $Q$  被曲面  $S$  所包围，曲面外有两个点电荷电量均为  $q$ ，现将其中一个  $q$  移入曲面内，下面说法哪个正确。(A) 曲面  $S$  的电场强度通量不变，曲面上各点场强变化；(B) 曲面  $S$  的电场强度通量变化，曲面上各点场强不变；(C) 曲面  $S$  的电场强度通量变化，曲面上各点场强变化；(D) 曲面  $S$  的电场强度通量不变，曲面上各点场强不变。



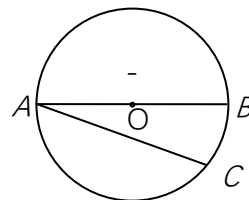
习题图 7-5

答：C

根据高斯定理： $\oint_{S_1} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_s q_i$ ，曲面的电场强度通量只与曲面内的电荷

有关，曲面上任意一点的电场强度与曲面内外的电荷都有关系。所以当一点电荷从曲面外移近取面内后，曲面的通量要发生变化，曲面上的电场强度与电荷的位置有关，所以曲面上的电场强度也要发生变化。

8. 如习题图 7-6 所示，点电荷  $-q$  位于圆心  $O$  处，A、B、C 为同一圆周上的三点。现将试验电荷从 A 点分别移动到 B，C 点，则从 A 点到 C 点电场力做功最大。请分析是否正确。

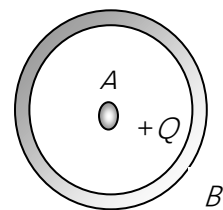


习题图 7-6

答：错误。

点电荷在空间产生的电场成球对称分布，A、B、C 三点离点电荷的距离相等，所以试探电荷在三点的电势相等，从而将一试验电荷从 A 点分别移动到 B 和 C 点，电场力做功都为 0。

9. 如习题图 7-7 所示, 在一个原来不带电的外表面为球形的空腔导体 B 内, 放置一带有  $+Q$  电荷的导体 A, 则空腔导体 B 的内表面不带电。请分析是否正确。



习题图 7-7

答: 错误。  
根据静电感应, 当导体达到静电平衡时, 导体内部电场强度处处为 0, 根据高斯定理, 导体内表面所带电荷与空腔导体包围的电荷代数和为 0, 所以内表面带  $-Q$  的电量。

10. 两个人手拉手站在一个绝缘平台上, 如习题图 7-8 所示, 男性体型较大。当男性右手触摸起电球后, 两人将同时带电, 请问: 他们所带的电荷量能相等吗? 若不相等, 那么谁身上的电荷更多?



习题图 7-8

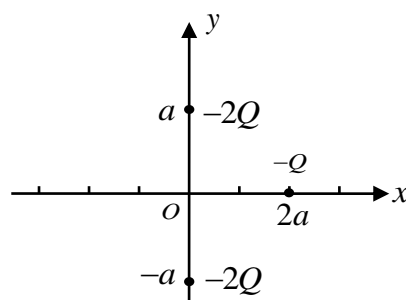
答: 所带电荷不等; 男性所带电荷多。

两人手拉手, 电势相等, 根据电势公式:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{q_i}{r}, \text{ 体积越大所带电荷越多。}$$

### 三、综合题

1. 如习题图 7-9, 三个点电荷分别分布在  $x, y$  轴上。(1) 分析各点电荷在 O 点产生电场强度的方向; (2) 写出各点电荷在 O 点产生的电场强度的大小; (3) 计算 O 点的电场强度大小; (4) 计算 O 点电势的大小。



习题图 7-9

解: (1)  $(0, a)$  处点电荷在 O 点产生的电场方向从 O 点指向 y 轴正向;

$(0, -a)$  处点电荷在 O 点产生的电场方向从 O 点指向 y 轴负向;

$(2a, 0)$  处点电荷在 O 点产生的电场方向从 O 点指向 x 轴正向。

$$(2) \quad E_a = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 a^2}; \quad E_{-a} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 a^2}; \quad E_{2a} = \frac{Q}{16\pi\epsilon_0 a^2}$$

$$(3) \quad \vec{E} = \vec{E}_a + \vec{E}_{-a} + \vec{E}_{2a}$$

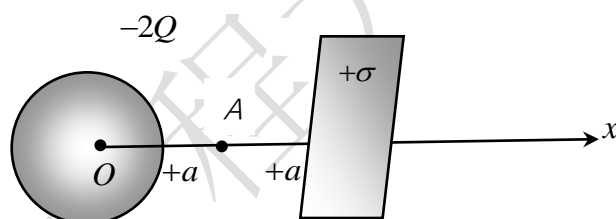
$$E_y = E_a - E_{-a} = 0$$

$$E_x = E_{2a} = \frac{Q}{16\pi\epsilon_0 a^2}$$

$$E = E_x = E_{2a} = \frac{Q}{16\pi\epsilon_0 a^2}, \text{ 从 } O \text{ 点指向 } x \text{ 轴正向}$$

$$(4) \quad V = \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i} = \frac{-2Q}{4\pi\epsilon_0 a} + \frac{-2Q}{4\pi\epsilon_0 a} + \frac{-Q}{8\pi\epsilon_0 a} = \frac{-9Q}{8\pi\epsilon_0 a}$$

2. 如习题图 7-10 所示, 有一半半径为  $R$  的均匀带电球壳, 所带电量为  $-2Q$ , 在距  $O$  点  $2a$  处放有一电荷面密度为  $+\sigma$  的无限大带电平面, 带电平面与  $x$  轴垂直。(1) 试画出距离球心距离为  $a$  的  $A$  点的电场强度方向;



习题图 7-10

度方向; (2) 请计算带电球壳在  $A$  点处产生的电场强度大小, 并指出方向; (3) 请计算无限大带电平面在  $A$  点处产生的电场强度大小, 并指出方向; (4) 请计算  $A$  点处总的电场强度。

解: (1)  $A$  点电场强度方向为从  $A$  点指向  $x$  轴负向;

(2) 由高斯定理得电球壳在  $A$  点处产生的电场强度大小

$$E_1 = \frac{2Q}{4\pi\epsilon_0 a^2} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 a^2}$$

带电球壳在  $A$  处激发的电场的方向从  $A$  点指向  $x$  轴负向;

(3) 无限大带电平面在  $A$  点处产生的电场强度大小为

$$E_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

无限大带电平面在  $A$  处激发的电场的方向从  $A$  点指向  $x$  轴负向;

(4) 由场强叠加原理可知

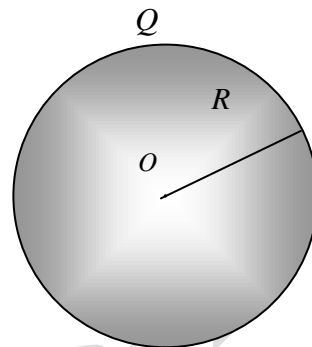
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

由于方向相同, 则

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0 a^2}$$

方向：从 A 点指向 x 轴负向。

3. 如习题图 7-11 所示，半径为  $R$  的均匀带电球体。电荷量为  $Q$ ，电荷体密度为  $\rho$ 。(1) 分析电荷对称性和电场分布情况，并画出电场线；(2) 利用高斯定理计算球内、外电场强度大小；(3) 试求球心处电势。



习题图 7-11

解：(1) 带电球体电荷分布具有球对称性，因此电场分布也具有球对称性；

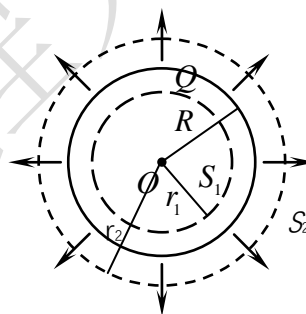
(2) 按高斯定理

$$\oint_{S_1} \vec{E} \cdot d\vec{S} = E_1 S_1 = \frac{\rho \cdot \frac{4}{3}\pi r_1^3}{\varepsilon_0} \quad (0 < r_1 < R)$$

$$\text{则 } E_1 = \frac{\rho r_1}{3\varepsilon_0} = \frac{Q r_1}{4\pi\varepsilon_0 R^3}$$

$$\oint_{S_2} \vec{E} \cdot d\vec{S} = E_2 S_2 = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad (r_2 > R)$$

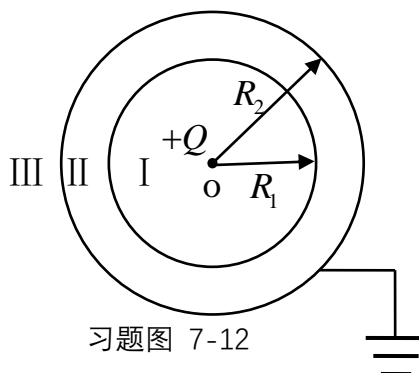
$$\text{则 } E_2 = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2}$$



(3) 球心电势

$$U = \int_0^\infty \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_0^R \frac{Q r_1}{4\pi\varepsilon_0 R^3} dr + \int_R^\infty \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r_2^2} dr = \frac{Q}{8\pi\varepsilon_0 R} + \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R} = \frac{3Q}{8\pi\varepsilon_0 R}$$

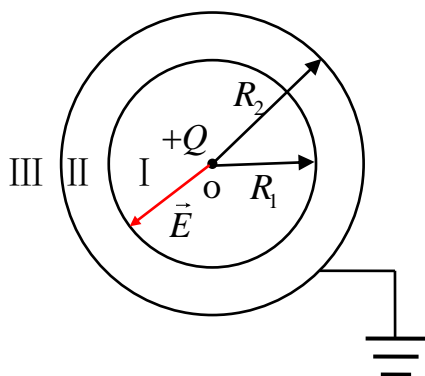
4. 如习题图 7-12 所示，将以电荷量为  $+Q$  的点电荷放在内外半径分别为  $R_1$ 、 $R_2$  的不带电金属球壳中心 O 点，球壳在点电荷的电场作用下达到静电平衡，球壳外表面接地。(1) 请分析球壳内外表面所带电荷；(2) 请画出 I、II、III 三个区域的电场线；(3) 试计算 I、II 两区域的电场强度大小。



习题图 7-12

解：（1）内表面带 $-Q$ 的电量，外表面接地不带电；

（2）



（3）根据高斯定理， $E_1 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$  ( $0 < r < R_1$ )

根据静电平衡条件知： $E_{II} = 0$

5. 如习题图 7-13 所示，空间有两个均匀带电的无限大平行平面，面电荷密度分别为 $\sigma$ 、 $-\sigma$ 。试求两个平面之间的电场强度。

解：正电荷在两个平面之间产生向右的电场强度，大小为：

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

负电荷在两个平面之间产生向右的电场强度，大小为：

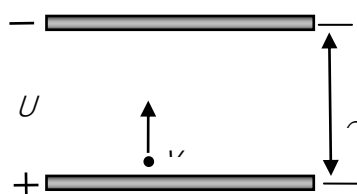
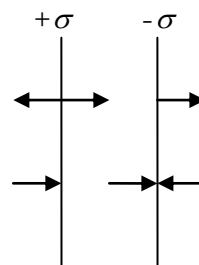
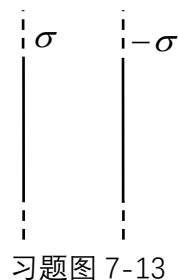
$$E_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

两平面之间的电场强度大小为：

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

方向水平向右。

6. 在密里根油滴实验中，由于操作失误将一带负电的待测油滴，从正极板以速度 $v$ 垂直释放进入电场，如习题图 7-14 所示。已知油滴质量为 $m$ ，重力加速度为 $g$ ，油滴到达负极板



习题图 7-14

时速度刚好为  $v/2$ 。若两极板间的距离为  $d$ ，极板间的电压为  $U$ ，（1）请分析油滴的受力情况；（2）请计算油滴的电量。

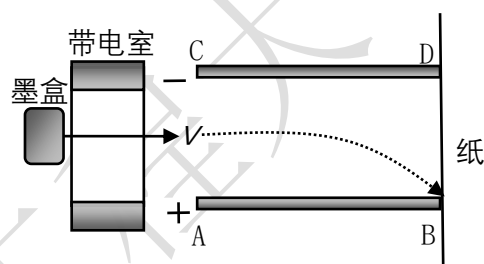
解：（1）油滴受竖直向下的重力  $mg$  和竖直向下的电场力  $qE$ ；

（2）油滴运动过程中只有重力和电场力做功，机械能守恒，则

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\left(\frac{v}{2}\right)^2 + mgd + qU$$

$$\text{得： } q = \frac{3mv^2 - 8mgd}{8U}$$

7. 喷墨打印机在纸上印字时，墨盒先将墨粉喷出，质量为  $m$  的墨粉穿过带电室后带上负电荷  $q$ ，带电墨粉以速度  $v$  从电场中心位置进入电场区域，并沿虚线路径到达正极板端点  $B$ ，然后打在纸面上，如习题图 7-15 所示。假设平板电容器两极板距离为  $d$ 、电压为  $U$ ，试求：



习题图 7-15

（1）墨粉到达平板边缘处  $B$  端处的速度；（2）电容器极板  $AB$  的长度。

解：（1）墨粉运动过程中只有电场力做功，机械能守恒，则

$$\frac{qU}{2} + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv'^2$$

$$\text{得： } v' = \sqrt{\frac{qU + mv^2}{m}}$$

（2）墨粉作平抛运动，在竖直方向上有，

$$\frac{d}{2} = \frac{1}{2}at^2$$

$$\text{得： } t = \sqrt{\frac{md^2}{qU}}$$

$$\text{则， } l = v\sqrt{\frac{md^2}{qU}}$$

8. 离子推进器的工作原理为:先将气体电离,然后用电场力将电离产生的离子加速后喷出,以其反作用力推动火箭。这是目前最为经济的一种实用化的火箭技术。如果用于产生电场的电压为  $U$ , 火箭在单位时间内喷出了总质量为  $M$  的离子。设单个离子的质量为  $m$ 、电荷量为  $q$ 。请计算(1)离子从火箭中喷出的速率;(2)单位时间内火箭受到的平均推力的大小。

解: 离子束中的离子是质量为  $m$ , 电量为  $q$  正离子。根据牛顿第二定律有

$$m \frac{dv}{dt} = qE$$

由电场强度与电势的关系有

$$E = -\frac{dU}{dx}$$

可得

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{d(qU)}{dx} = -\frac{dE_p}{dx}$$

求解得:  $\frac{1}{2}mv^2 + E_p = W_0$ , 其中  $W_0$  是初始能量, 数值为 0; 可以看出加速的过程是将电势能转换成了离子的动能。

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

由冲量定理的, 单位时间推进力为

$$F = \frac{Mv - 0}{\Delta t} = \frac{M\sqrt{2mqU}}{m\Delta t}$$

9. 假如在一次闪电中, 云与地之间的电势差为  $2.0 \times 10^9 \text{ V}$ , 在此过程中有 50C 的电荷被转移。请计算: (1) 转移这些电荷会释放多少能量? (2) 假如该闪电击中冰块, 冰的融化热是  $3.33 \times 10^5 \text{ J/kg}$ , 则它将融化多少冰?

解: (1) 转移这些电荷会释放的能量为

$$W = QU = 50\text{C} \times 2.0 \times 10^9 \text{ V} = 1.0 \times 10^{11} \text{ J}$$

(2) 融化冰的质量为

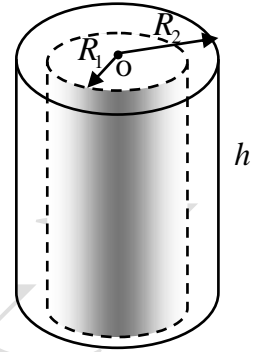
$$m = \frac{W}{L} = \frac{1.0 \times 10^{11} \text{ J}}{3.33 \times 10^5 \text{ J/kg}} = 3 \times 10^5 \text{ kg}$$



10. 在闪电过程中, 由于空气分子间的放电现象将产生大量的能量, 假设空气中两个放电点之间的电势差为  $10^9\text{V}$ , 被中和的电荷为  $30\text{C}$ 。试求: 在这两点之间闪电释放的能量是多少?

解: 根据电能公式得:  $W_e = QU = 30\text{C} \times 10^9\text{V} = 3.0 \times 10^{10}\text{J}$

11. 如习题图 7-16 所示, 一圆柱形电容器两极板分别为同心的圆柱体和圆筒, 圆柱体半径为  $R_1$ , 圆筒半径为  $R_2$  ( $R_1 < R_2$ ), 电容器长为  $h$ , 两极板间为真空。设圆柱体和圆筒分别有带  $+Q$ 、 $-Q$  的电量, 请计算: (1) 电容器两极板间的电场强度; (2) 该电容器的电容。



习题图 7-16

解: (1) 根据高斯定理, 要求极板间的电场强度, 作一个半径为  $r$  ( $R_1 < r < R_2$ ), 长为  $h$  的圆柱形高斯面, 则由静电场高斯定理得

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum_i q_i}{\epsilon_0}$$

$$2\pi r h E = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 h r} \quad (R_1 < r < R_2)$$

(2) 两极板间的电势差为

$$V = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 h r} dr = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 h} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

由电容定义得

$$C = \frac{Q}{V}$$

$$C = \frac{Q}{\frac{Q}{2\pi\epsilon_0 h} \ln \frac{R_2}{R_1}} = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

## 四、开放性习题

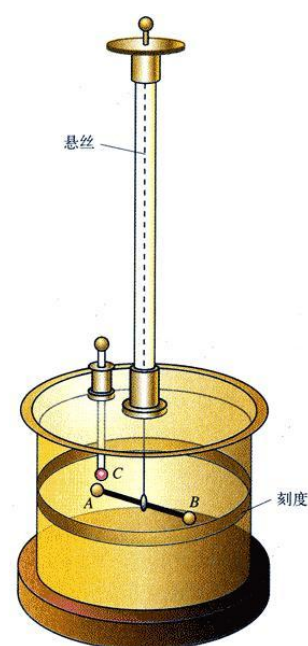
物理学家库仑发明了扭秤装置来研究静电力，他通过扭秤实验发现两个点电荷之间相互作用力与距离平方成反比，得到了著名的库仑定律。扭称的设计极其巧妙，请通过调研分析扭秤在当时测量水平较低的情况下，是怎样通过物理量转换测量方法来测量看不见的静电力的？是怎样实现对静电力这种微小力的测量的？

### 习题指导与参考答案：

本题目的在于让学生探究“库仑扭称实验”原理及物理量的测量，领会物理建模及实验构思设计的途径与方法，启发学生在把想法变成现实的过程中，如何去建立正确可行的研究方案，如何基于已有知识与技术搭建研究系统，如何正确地定性观察、定量计算，最终实现目标或有所发现。

#### (1) 库仑设计扭秤实验的基本想法

在物理学发展早期，人们对微弱作用的测量感到十分困难，没有任何适合的仪器设备。后来物理学家们想到了悬丝，尽管要把一根丝拉断需要较大的力，但要使一根悬丝发生扭转，仅需一个很小的力就能做到。基于这个想法，加上当时已经建立的力学杠杆原理，英国家科、卡文迪许分别于 1785 年和 1789 年独立地发明了扭秤。卡文迪许用他发明的扭秤，验证了牛顿万有引力定律的正确性，并测出了引力常量。18 世纪中叶，电磁学虽然还在起步阶段，对电磁力仅存种种猜测，但已有不少科学家猜测电场力与万有引力一样，服从平方反比定律。当时，库仑把电场力与万有引力类比，在认定电场力与距离平方成反比的前提下，利用自己发明的扭秤，研究带电小球之间的相互作用关系，最终证明了牛顿力学中的平方反比定律，在电场力中也成立，证明了电场力与电荷电量乘积成正比，建立了反映电荷相互作用规律的库仑定律，第一次打开了电的数学理论大门，使静电学进入了定量研究的新阶段。



---

## (2) 静电力测量方法及实验设计

库仑的扭秤示意图如图所示，该装置能测量微弱作用关键在于它能把微弱作用效果经过两次转换和放大成为可以测量的物理量。第一次转换与放大：将微小的力通过较长的力臂产生较大力矩，使悬丝产生一定角度的扭转，将力转换为角度；第二次转换与放大：在悬丝上固定一平面镜，把入射光线反射到距离平面镜较远的刻度尺上，从而反射光线的光点在刻度尺上移动，把悬丝微小扭转的角度转换且放大为刻度尺上的移动距离。

## (3) 扭秤测量量化表达式

当带电小球受静电力时，悬挂的杠杆将在力矩作用下转动，杠杆转动将使反射光的光点在刻度尺上移动，由此可以反推出杠杆转动角度与杠杆力矩的定量关系，根据力矩公式  $M = F \times L$ ，其中  $M = \theta d^4 / L = K\theta$ （ $d$  为铁丝直径， $L$  杠杆的半长），得出库伦力  $F = M/L = K\theta/L$ ，从而可利用悬丝扭转的角度计算出两点电荷之间的静电力的大小。

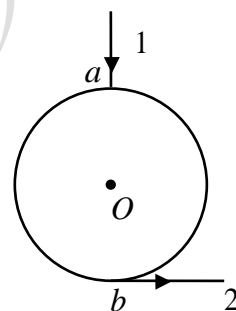
## 第八章 稳恒磁场

### 一、分析题

1. 对于磁感应强度  $\vec{B}$ ，下列说法是否正确。(1) 磁感应强度  $\vec{B}$  是反映磁场某点性质的物理量，磁场中任意一点都有一特定方向是  $\vec{B}$  的指向；(2) 在磁场中一条给定的磁感线上，各点  $\vec{B}$  的大小相同，方向分别沿磁感线方向；(3) 公式  $\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$  和  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$  中， $\vec{F}$  与  $\vec{B}$  始终垂直。

答：(1) 对；(2) 错；(3) 对

2. 如习题图 8-1 所示，在真空中一电流强度为  $I$  的电流由长直导线 1 沿半径方向经  $a$  点流入一由电阻均匀的导线构成的半径为  $R$  的圆环，再由  $b$  点沿切向从圆环流出，经长直导线 2 返回电源， $a$ 、 $b$  两点和圆心  $O$  在同一直线上。



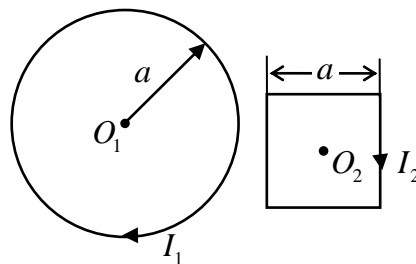
请分析 (1) 长直导线 1 在圆环中心  $O$  处的磁感强度  $\vec{B}$  的大小；

(2) 长直导线 2 在圆环中心  $O$  处的磁感强度  $\vec{B}$  的大小；(3) 习题图 8-1

圆环中心  $O$  处的磁感强度  $\vec{B}$  的大小和方向。

答：(1)  $B_1 = 0$ ；(2)  $B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$ ；(3) 因为  $B_3 = 0$ ，所以  $B = B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}$ ，垂直纸面向外。

3. 如习题图 8-2 所示，有一半径为  $a$  的圆圈电流  $I_1$  和一边长为  $a$  载流的正方形线圈电流  $I_2$ 。



若要使两个线圈的中心  $O_1$ 、 $O_2$  处的磁感强度大小相等，请问电流  $I_1$  与电流  $I_2$  的比值为多少？

习题图 8-2

答：  $B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2a}$

$$B_2 = 4 \times \frac{\mu_0 I_2}{4\pi \times \frac{a}{2}} (\cos 45^\circ - \cos 135^\circ) = \frac{2\sqrt{2}\mu_0 I_2}{\pi a},$$

因为  $B_1 = B_2$ , 所以  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi}$

4. 置于磁场中的磁介质, 表面会形成磁化电流, 请分析该磁化电流能否产生焦耳热? 并说明原因。

答: 不能, 因为磁化电流不是传导电流。

5. 在工厂里搬运热钢锭时, 能不能用电磁铁起重机? 请说明原因。

答: 不能, 电磁起重机是利用线圈中的交变电流产生磁场来吸引起钢锭的, 如果用热钢锭, 会损坏线圈, 导致不能产生磁场。

6. 磁铁可以吸附铁屑, 为什么不能吸附铝粉和铜粉?

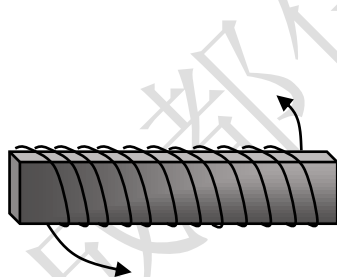
答: 铁屑属铁磁类物质, 遇磁铁磁化后和磁铁相互吸引。铝粉和铜粉不属于铁磁类物质, 不会被磁铁磁化, 因此, 无法与磁铁相互吸引。

7. 如习题图 8-3 所示, 对于截面为正方形的密绕长直螺线管, 其管内磁场是均匀磁场吗? 管内磁感应强度能否用  $B = \mu n I$  来计算?

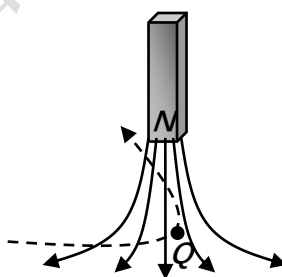
答: 均匀磁场, 可以

8. 将一磁铁放在光滑的水平面上, 并在其附近静止释放一个小钢珠, 小钢珠将逐渐滚向磁铁。请问小钢珠的动能从何而来?

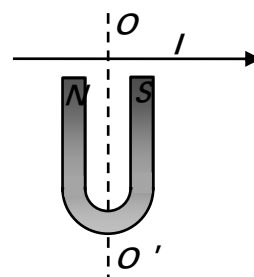
答: 磁能



习题图 8-3



习题图 8-4



习题图 8-5

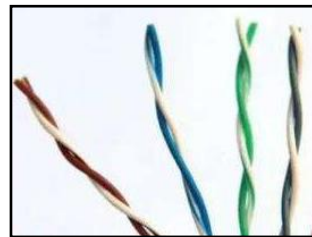
9: 如习题图 8-4 所示, 正点电荷  $Q$  经过一个静止的条形磁铁下方时, 运动方向发生了偏转。请问: 电荷  $Q$  的动能会发生变化吗? 请说明原因。

答: 不会, 电荷在洛伦兹力作用下做圆周运动, 洛伦兹力不做功, 速度大小不变。

10. 如习题图 8-5 所示, 有一 U 型磁铁竖直放置, 并在上方放置一根直导线, 导线可自由移动或转动, 请问: 当直导线通上电流后, 导线将如何运动?

答: 在水平面上沿  $OO'$  轴逆时针转动并向下运动。

11. 在电子仪器中, 使用的导线经常是被扭成如习题图 8-6 所示的麻花状, 人们这样做是为了克服什么物理现象的影响? 请说明原因。



习题图 8-6

答: 克服导线之间的排斥力。

### 三、综合题

1. 无限长直导线通有  $50\text{A}$  电流, 在离导线  $5.0\text{cm}$  处有一电子以速度  $1.0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  运动。试求下列情况电子受到的洛伦兹力: (1) 当电子的速度平行于导线时; (2) 当电子的速度垂直指向于导线时; (3) 当电子的速度垂直于导线和电子构成的平面时。

解: 因为通电直导线周围磁感应强度大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

则电子在磁场中运动受到的洛伦兹力为

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} = qvB \sin \theta$$

(1)  $\theta = 90^\circ$  时

$$\begin{aligned} F_m &= qvB \sin \theta = qv \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \sin 90^\circ = 1.6 \times 10^{-19} \times 1.0 \times 10^7 \times \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 50}{2\pi \times 5.0 \times 10^{-2}} \text{ N} \\ &= 3.2 \times 10^{-16} \text{ N} \end{aligned}$$

(2)  $\theta = 90^\circ$  时

$$\begin{aligned} F_m &= qvB \sin \theta = qv \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \sin 90^\circ = 1.6 \times 10^{-19} \times 1.0 \times 10^7 \times \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 50}{2\pi \times 5.0 \times 10^{-2}} \text{ N} \\ &= 3.2 \times 10^{-16} \text{ N} \end{aligned}$$

(3)  $\theta = 0^\circ$  时

$$F_m = qvB \sin \theta = qv \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \sin 0^\circ = 0 \text{ N}$$

2. 通有电流1.5A、长为30cm的直导线被放置在磁感应强度为 $8.0 \times 10^{-2} \text{T}$ 的匀强磁场中，磁场方向与导线成 $30^\circ$ 角，试求导线所受的作用力。

解:因为匀强磁场中直导线所受的作用力

$$F_m = BIL \sin \theta$$

所以导线所受的作用力为

$$F_m = BIL \sin \theta = 8.0 \times 10^{-2} \times 1.5 \times 0.3 \times \sin 30^\circ \text{ N} = 1.8 \times 10^{-2} \text{ N}$$

3. 如习题图 8-7 所示，一绝缘“无限长”直导线，载有电流  $I$ ，并在其中部绕一半径为  $R$  的圆圈。试求：（1）直导线和圆圈两部分电流在  $O$  点产生的磁感强度；（2）圆心  $O$  点处的磁感强度是多少？

解:（1）直载流导线在圆心  $O$  点产生的磁感强度为  $\vec{B}_1$

$\vec{B}_1$  大小为

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

$\vec{B}_1$  方向垂直纸面向外；

圆线圈电流在圆心  $O$  点产生的磁感强度为  $\vec{B}_2$

$\vec{B}_2$  大小

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

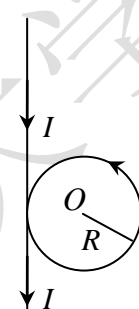
$\vec{B}_2$  方向垂直纸面向外；

（2）圆心  $O$  点处的磁感强度为  $\vec{B}$

$\vec{B}$  大小

$$B = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0 I(\pi + 1)}{2\pi R}$$

$\vec{B}$  方向垂直纸面向外。



习题图 8-7

4. 传统的电视机利用显像管里的电子枪发射电子束, 这些电子束击中彩色显像管的荧光屏后形成彩色图像。如果在电视显像管里, 电子枪每秒可发射  $5.6 \times 10^{14}$  个电子。电子束可看作长直电流, 请计算: 在电子束周围距电子束轴线  $1.5\text{mm}$  处, 电子束产生的磁感应强度。

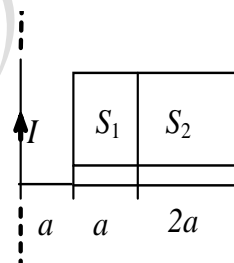
解: 因为电子束形成的电流为

$$I = ne = 5.6 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} = 8.96 \times 10^{-5} \text{ A}$$

所以电子束产生的磁感应强度大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \times 8.96 \times 10^{-5} \text{ A}}{2\pi \times 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}} = 1.20 \times 10^{-8} \text{ T}$$

5. 如习题图 8-8 所示, 在通有电流  $I = 0.50\text{A}$  的无限长直载流导线的右侧, 放置了两个面积为  $S_1$  和  $S_2$  的矩形回路, 两个回路的长为  $l = 0.20\text{m}$ , 宽分别为  $a$ 、 $2a$  ( $a = 0.10\text{m}$ ), 矩形回路的一边与长直载流导线平行, 两者在同一平面。请计算 (1) 通过矩形回路  $S_1$  的磁通量是多少? (2) 通过矩形  $S_2$  的磁通量是多少? (3) 通过回路  $S_1$  和  $S_2$  的磁通量之比是多少?



习题图 8-8

解: 无限长直载流导线周围磁感应强度大小为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$$

在距离直导线  $x$  处取宽度为  $dx$  的小矩形, 其磁通量为

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int \frac{\mu_0 I}{2\pi x} l dx$$

(1) 通过矩形回路  $S_1$  的磁通量为

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \int_a^{2a} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} l dx = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln \frac{2a}{a} \\ &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \times 0.50 \text{ A} \times 0.20 \text{ m}}{2\pi} \ln 2 \\ &= 1.38 \times 10^{-8} \text{ T} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

(2) 通过矩形  $S_2$  的磁通量为



$$\begin{aligned}
 \phi_2 &= \int_{2a}^{4a} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} l dx = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln \frac{4a}{2a} \\
 &= \frac{4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \times 0.50 \text{ A} \times 0.20 \text{ m}}{2\pi} \ln 2 \\
 &= 1.38 \times 10^{-8} \text{ T} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned}$$

(3) 通过回路  $S_1$  和  $S_2$  的磁通量之比为

$$\frac{\phi_1}{\phi_2} = 1$$

6. 一铜片厚度  $d = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ , 放在  $B = 3.0 \text{ T}$  的匀强磁场中, 已知磁场方向与铜片表面垂直, 铜的载流子密度  $n = 8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ , 当铜片中通有与磁场方向垂直的电流  $I = 200 \text{ A}$  时, 求 (1) 铜片两端的霍尔电势为多少? (2) 铜片的霍尔系数为多少?

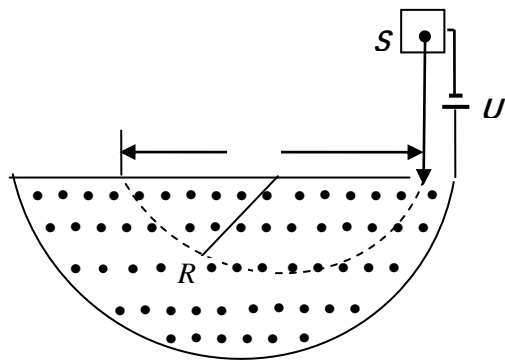
解: (1) 铜片两端的霍尔电势为

$$\begin{aligned}
 U_H &= \frac{1}{ne} \cdot \frac{IB}{d} \\
 &= \frac{200 \text{ A} \times 3.0 \text{ T}}{8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 2.0 \times 10^{-3} \text{ m}} \\
 &= 2.23 \times 10^{-5} \text{ V}
 \end{aligned}$$

(2) 铜片的霍尔系数为

$$\begin{aligned}
 R_H &= \frac{1}{ne} \\
 &= \frac{1}{8.4 \times 10^{28} \text{ m}^{-3} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \\
 &= 7.43 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{C}
 \end{aligned}$$

7. 习题图 8-9 所示为一质谱仪, 离子源  $S$  可产生质量为  $m$ 、电荷为  $q$  的粒子, 粒子的初速度为零。当带电粒子经电势差为  $U$  的电场加速后, 进入磁感强度为  $B$  的均匀磁场, 沿一半圆形轨道到达距离磁场入口为  $x$  处的感光底板上。试求: (1) 粒子到达磁场入口处的速度是多少? (2) 电势差  $U$  是多少?



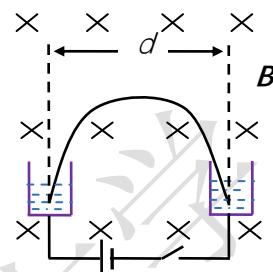
习题图 8-9

解：（1）由圆周运动半径  $R = \frac{mv}{qB}$  得，  $v = \frac{qBd}{2m}$

（2）电场力做功转换为粒子径的动能，  $qU = \frac{1}{2}mv^2$ ，得

$$U = \frac{m}{2q} \left( \frac{qBd}{2m} \right)^2 = \frac{qB^2 d^2}{8m}$$

8. 如习题图 8-10 所示，一质量为  $m$  的  $U$  型导线，两端分别浸没在两个水银槽中，导线两端的水平距离为  $d$ ，空间有一均匀磁场  $B$ ，磁场方向垂直竖直面里。两个水银槽分别与一个电源的正负极相连，当电源接通电源后， $U$  型导线将会从水银槽中跳起来。请问：



习题图 8-10

（1） $U$  型导线跳起的原因；（2）假设导线跳起的高度为  $h$ ，那么通过导线的电荷有多少？

解：（1）安培力作用；

（2）根据动量定理，有

$$BId\Delta t = mv \quad (1)$$

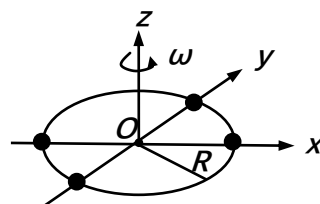
导线跳离水银杯后只受重力作用，有

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh \quad (2)$$

将式（1）、（2）代入  $Q = I\Delta t$  有，

$$q = \frac{m\sqrt{2gh}}{Bd}$$

9. 如习题图 8-11 所示，在  $xoy$  平面上，以坐标原点  $O$  为中心作一半径为  $R$  的圆，在圆上均匀分布着 4 个电量为  $+q$  的点电荷。假设圆以角速度  $\omega$  绕  $oz$  轴旋转时，试求：（1）圆上产生的电流大小是多少？



习题图 8-11

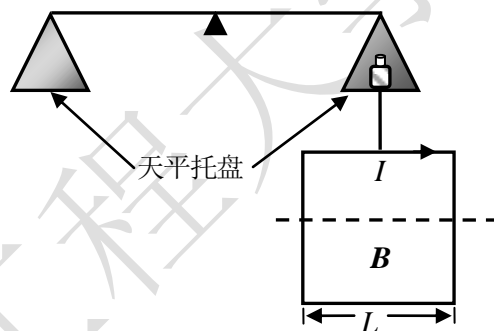
（2）在圆心  $O$  点产生的磁感应强度是多少，方向怎样？

解：(1) 根据  $I = \frac{Q}{\Delta t}$  有，

$$I = \frac{4q}{2\pi} = \frac{2q\omega}{\pi}$$

(2) 根据圆电流磁场公式有  $B = \frac{\mu_0 I}{2R} = \frac{\mu_0 q \omega}{\pi R}$ ，沿 Z 轴正向。

10. 习题图 8-12 为一测量磁感应强度的装置，包括一台天平、一个边长为 0.1m 的正方形导线框。在空间有磁场  $B$  为匀强磁场、方向垂直纸面，线框挂在天平右托盘下，并将其下半部分线框至于磁场中。当线框没通电时，将天平调节至平衡状态，线框通以电流  $I$  后，线框将受到磁力作用力导致天平平衡被打破，为了再度使天平平衡，需要在天平托盘中加砝码。试求：(1) 若电流  $I = 0.2\text{A}$ ，在天平右托盘加入质量为 10g 的砝码后，天平重新达到平衡。此时，匀强磁场  $B$  的方向怎样？磁感应强度的大小是多少？(2) 若通过线框的电流不变，但磁场磁感强度  $B$  减小为原来的一半、方向保持不变，且右盘中砝码也不变，要使天平重新平衡，需要在哪个托盘中加砝码，加入砝码的质量为多少？



习题图 8-12

解：(1) 根据受力平衡知，砝码的重力与安培力大小相等，方向相反，由此推断磁场方向垂直直面向外，

$$BIL = mg \text{ 有}$$

$$B = \frac{mg}{IL} = \frac{10 \times 10^{-3} \text{kg} \times 10 \text{N/kg}}{0.2 \text{A} \times 0.1 \text{m}} = 5 \text{T}$$

(2) 当磁场减小一半，这时左边所受合力为：

$$\Delta F = mg - B'IL = 10 \times 10^{-3} \text{kg} \times 10 \text{N/kg} - 2.5 \text{T} \times 0.2 \text{A} \times 0.1 \text{m} = 0.05 \text{T}$$

因此，在左盘需要加砝码：

$$m'g = \Delta F \Rightarrow m' = \frac{0.05 \text{T}}{10 \text{N/kg}} = 5 \text{g}$$

11. 将一个边长为  $a = 0.2\text{m}$ , 匝数  $N = 50$  匝, 通过电流为  $2\text{A}$  的正方形线圈放在磁感应强度  $B = 0.05\text{T}$  的均匀磁场中, (1) 线圈处于什么方位时受到的磁力矩最大? 大小是多少; (2) 线圈处于什么方位时受到的磁力矩最小? 大小是多少; (3) 线圈由磁力矩最大方位转到磁力矩最小的方位这个过程中, 磁力矩做的功大小是多少? 是正功还是负功。

解: (1) 因为磁力矩为

$$\vec{M} = \vec{m} \times \vec{B}$$

所以  $\vec{B} \perp \vec{e}_n$  时, 磁力矩最大, 大小是

$$M = NISB \sin 90^\circ = 50 \times 2\text{A} \times (0.2\text{m})^2 \times 0.05\text{T} = 0.2\text{N} \cdot \text{m}$$

(2)  $\vec{B} // \vec{e}_n$  时, 磁力矩最小, 大小是

$$M = NISB \sin 0^\circ = 0$$

(3) 线圈由磁力矩最大方位转到磁力矩最小的方位这个过程中, 磁力矩做的功大小为

$$W = \int_{90^\circ}^{0^\circ} M d\theta = \int_{90^\circ}^{0^\circ} Bm \sin \theta d\theta = \int_{90^\circ}^{0^\circ} 0.2 \sin \theta d\theta = 0.2\text{J}$$

是正功。

12. 一螺线管长  $l = 10\text{cm}$ , 匝数  $N = 200$ , 电流  $I = 100\text{mA}$ 。求: (1) 管内为真空时的磁感应强度; (2) 管内充满相对磁导率  $\mu_r = 4200$  的磁介质时的磁感应强度。

解: (1) 管内为真空时的磁感应强度大小是

$$\begin{aligned} B_0 &= \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{l} I \\ &= 4\pi \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1} \times \frac{200}{0.1\text{m}} \times 100 \times 10^{-3} \text{A} \\ &= 2.51 \times 10^{-4} \text{T} \end{aligned}$$

(2) 管内充满相对磁导率  $\mu_r = 4200$  的磁介质时的磁感应强度大小是

$$\begin{aligned} B &= \mu_r B_0 \\ &= 4200 \times 2.51 \times 10^{-4} \text{T} \\ &= 1.06 \text{T} \end{aligned}$$

## 四、开放性习题

1829 年，英国物理学家法拉第发现，将铁屑洒在一块磁铁上，铁屑将呈现出蜘蛛网状，他以图形的形式描绘出了一种看不见的力的分布，他称之为“力场”，第一次提出“场”的概念。在之后的一个半世纪里，物理学家们受力场的启发，逐渐探明了力场的本质，并进一步发现了引力场、电力场、磁力场等，这些力场的研究极大地推动了现代科技发展，促进了人类社会的进步。请调研“场论”发展史，叙述自己对场这种特殊物质的理解。

### 习题指导与参考答案：

本题目的在于引导学生去调研“场”的发展历史，了解一个科学概念和理论的建立过程，以及该过程对科学发展的影响，培养学生抽象思维能力及批判性思维，以及透过现象看本质的能力。

#### (1) “场”发展的主要历程

库仑定律揭示了电荷之间的相互作用规律，但是力具有三要素，电荷间作用力的作用点在哪里？这种力是靠什么来进行传递的呢？

物理学发展早期，在牛顿以前就存在一种超距作用的猜想，认为物体之间除了接触作用以外，还存在一种可以超越时间和空间的相互作用；与之相反的一种观点是近距作用，认为所有作用力都需要中间媒介的传递，这个媒质称为“以太”，这两种观点在 18 世纪初竞争激烈。万有引力定律的发现似乎证实了超距作用的存在，尽管牛顿一直反对超距作用，但在 19 世纪大半叶，超距作用还是占据了统治地位，超距作用也被引入了电磁力的研究中。但是法拉第反对超距作用观点并进行批判，它在研究载流导线磁现象过程中，认识到磁力是圆形力，导线周围存在着“张力”，这种张力是通过某种媒介传递的近距作用，初步有了“力线”和“场”的思想，后来他提出了“磁力线”的概念，并用铁屑将它显示出来，再后来他又提出了“电力线”的概念，并在实验上找到证据。这些研究使法拉第坚信，在磁体、带电体、载流导线周围存在着一种连续介质，起着传递电力和磁力的作用，这就是“场”的萌芽及基本思想。到了 1845 年法拉第第一次用了“磁场”这个词，两年后使用了“场”这个词，成为了近距作用观念中的新概念，法拉第用他提出的新概念解释了电磁现象。

---

## (2) 场的本质及其重要意义

“场”是一种特殊形式的物质，它是实体物质以外的另一种物质存在的基本形式，是能量传递的一种介质。场广泛存在于我们周围，例如电磁场、引力场。

“场”是物理学中革命性的新概念，它让人们认识了一种全新的物质存在形式。在场的概念确立之后，人们逐渐发现了电场、磁场是有能量、动量、质量和速度的，逐步形成了电磁场理论，而电磁场的研究和电磁波的利用把人类带进了信息时代，而对引力场的研究则为人类遨游太空提供了理论基础。

---

## 第九章 电与磁的联系

### 一. 分析题

1. 一个人来到陌生的星球上, 想利用一个灵敏电流计和一个线圈测量周围是否存在磁场, 他应该怎样做?

答: 将灵敏电流计与线圈连接, 构成一个闭合回路。根据电磁感应定律, 当改变闭合回路位置时, 观察灵敏电流计的指针是否发生偏转可测量周围是否存在磁场。如果这个回路的周围存在磁场, 当改变这个闭合回路的位置时, 回路中有电流产生, 灵敏电流计的指针将会偏转; 反之, 如果没有磁场存在, 灵敏电流计的指针就不会偏转。

2. 将条形磁铁沿着铜环的轴线插入时, 铜环中有感应电流和感应电场吗? 若用塑料圆环替代铜质圆环, 结果会怎样?

答: 变化的磁场要产生感生电场。当条形磁铁插入时, 不管是铜环还是塑料圆环, 都存在变化的磁场, 因此都会产生感生电场。要形成感应电流, 需要有可以自由移动的电荷。铜线内有自由电子, 感生电场就会驱动电荷移动产生感应电流, 塑料环内没有可以自由移动的电荷, 就不会形成感应电流。

3. 电风扇一般有几个档位, 每档可产生不同的风速。扇叶不同的转速对应内部不同的电路, 电路中串有一个电感线圈; 改变电感线圈匝数可以调节电路的电流, 达到改变扇叶转速的目的。请分析如何利用电感匝数的变化来改变电路的电流。

答: 电风扇使用的是交流电, 利用电感线圈来调节风速。电感线圈有几个抽头, 不同的抽头对应线圈的匝数不同。电风扇的一个档位与电感线圈的一个抽头串联构成一个回路。当该回路通交流电后, 电流的变化使电感线圈产生自感电动势, 阻碍电流的变化。换挡时, 回路与不同抽头串联, 电感线圈的匝数变化, 回路的自感电动势随线圈匝数的变化而变化, 使回路中的电流变化, 导致扇叶转速改变。

4. 实验室中一般可以获得的强电场为 $1 \times 10^6 \text{ V/m}$ 左右, 强磁场约为 $2.0 \text{ T}$ 。请比较电场能量密度和磁场能量密度的大小, 并分析哪种场更利于储存能量?

答：磁场的能量密度： $\omega_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} = \frac{1}{2} \times \frac{(2.0\text{T})^2}{4\pi \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}} = 1.59 \times 10^6 \text{J/m}^3$

电场的能量密度： $\omega_e = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 = \frac{1}{2} \times 8.85 \times 10^{-12} \text{F/m} \times (1 \times 10^6 \text{V/m})^2 = 4.42 \text{J/m}^3$

显然，磁场的能量密度远大于电场的能量密度，磁场更利于储存能量。

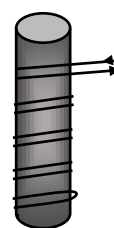
5. 如果一个人用两只手同时与电池正负极直接接触，双手几乎没有任何感觉。但是，若用双手分别捏住一根长直螺线管的两端，再分别接触电池正负极并马上断开，双手会有强烈的触电感。请分析产生这两种情况的原因。

答：电池电压小，不足以电到人；螺线管自感产生高电压，使人有触电感

6. 有两个金属环，一个半径大、另一个半径小。为了使两个金属环能产生较强的互感现象，两个环的位置是平行放置、还是小环套于大环中呢？两金属环的平面是应该平行放置、还是垂直放置？

答：小环套在大环中；平行放置。

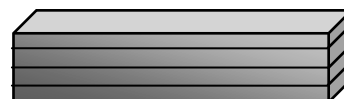
7. 有些电阻元件是用电阻丝绕成的，为了使它免于自感的干扰，电阻丝一般采用双绕法，如习题图9-1所示。试说明为什么要这样绕。



习题图 9-1

答：消除互感。

8. 如习题图9-2所示，电机或变压器中的线圈铁芯都是用彼此绝缘的一片一片的硅钢片叠加而成。请问：若将铁芯换成一整块铁片，这样做会带来怎样的影响？



习题图 9-2

答：铁芯内部出现涡电流，浪费电能，温度过高，烧坏设备。

9. 变化磁场所产生的电场，是否也一定随时间发生变化？变化电场所产生的磁场，是否也一定随时间发生变化？

答：不一定，磁场随时间变化恒定时，它所产生的电场为恒定的；电场随时间变化恒定时，它所产生的磁场也是恒定的。

### 三、综合题



1. 子弹速度的测量可以采用下述方法：在子弹的尖端上装一根细小的永久磁针，再让子弹连续通过两个相距为  $L$  的线圈，线圈中将产生两个时间间隔为  $\Delta t$  的两个脉冲电流。（1）线圈中产生的感应电动势是动生电动势还是感生电动势？

（2）由此测出子弹的速度是多少？

解：（1）两个线圈都没动，装在子弹尖端的磁针运动导致穿过线圈的磁通量发生变化而产生电动势，所以线圈中产生的感应电动势是感生电动势。

（2）在子弹的尖端上装一根细小的永久磁针，连续通过两个相距为  $L$  的线圈，测出在线圈中产生的两个脉冲电流的时间间隔  $\Delta t$ ，因为

$$L = v \cdot \Delta t$$

所以可测出子弹的速度

$$v = \frac{L}{\Delta t}$$

2. 海洋学家依靠水流通过地磁场所产生的电动势，来探测海洋中水的流动情况。设在某处地磁场的竖直分量为  $0.70 \times 10^{-4} \text{T}$ ，两个电极垂直插入被测的水流中，相距 200 米，如果测得两电极之间的电势差为  $7.0 \times 10^{-3} \text{V}$ 。请问：（1）产生的电动势是动生电动势还是感生电动势？（2）计算水流的速率。

解：（1）磁场没有发生变化，水作为导体在运动，因此产生的电动势为动生电动势。

（2）水作为导体在运动，产生的动生电动势为

$$\varepsilon = Blv$$

所以水流的速率为

$$v = \frac{\varepsilon}{Bl} = \frac{7.0 \times 10^{-3} \text{V}}{7.0 \times 10^{-5} \text{T} \times 200 \text{m}} = 0.5 \text{m/s}$$

3. 在我国 50 周年国庆盛典上，某型号的超音速歼击轰炸机在天安门广场上空沿水平方向自西向东呼啸而过。设北京地磁场的竖直分量为  $0.42 \times 10^{-4} \text{T}$ ，飞机两边机翼总长 12.7m，飞机速度为 550m/s。（1）计算该机两翼间的电势差；（2）指出哪端电势高？

解：（1）超音速歼击轰炸机在天安门广场上空沿水平方向自西向东呼啸而过，两机翼间会产生动生电动势，所以该机两翼间的电势差为

$$\varepsilon = Blv = 4.2 \times 10^{-5} \text{T} \times 12.7 \text{m} \times 550 \text{m/s} = 0.29 \text{V}$$

（2）电动势的方向为  $\vec{B} \times \vec{v}$  的方向，即：北端电势高。

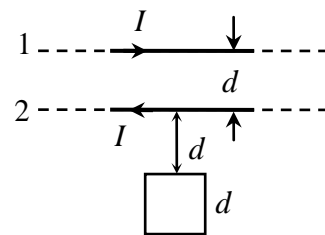
4. 一呼吸器由 90 匝线圈绕制而成，当人由呼气转为吸气时，线圈面积由  $0.12 \text{m}^2$  变为  $0.124 \text{m}^2$ 。设地球磁场为  $B = 0.5 \times 10^{-4} \text{T}$ ，与线圈之间的夹角为  $60^\circ$ ，人吸气的时间间隔为  $1.59 \text{s}$ 。（1）分析人在一个吸气和呼气周期中呼吸器中产生电动势的方向？（2）试计算人吸气时呼吸器中产生的电动势。

解：（1）在一个吸气或一个呼气周期中，线圈面积大小的变化相同，方向相反，其他因素不变，因此产生的电动势的大小相同，方向相反。

（2）人吸气时呼吸器中产生的电动势

$$\begin{aligned} \varepsilon &= N \frac{d\phi}{dt} \\ &= N \frac{B \Delta S \cos 60^\circ}{\Delta t} \\ &= 90 \times \frac{5.0 \times 10^{-5} \text{T} \times (0.124 \text{m}^2 - 0.12 \text{m}^2) \times 0.5}{1.59 \text{s}} \\ &= 5.7 \times 10^{-6} \text{V} \end{aligned}$$

5. 如习题图 9-3 所示，两无限长直导线 1 和 2 相距为  $d$ ，载有大小相等、方向相反的电流  $I$ ，电流变化率  $\frac{dI}{dt} = k > 0$ 。一个边长为  $d$  的正方形线圈位于导线平面内，与 2 导线相距为  $d$ 。试求：（1）



习题图 9-3

线圈中感生电动势的大小；（2）线圈中感生电动势和感生电流的方向。

解：（1）规定顺时针方向为线圈回路的正方向

载流为  $I$  的无限长直导线在与其相距为  $r$  处产生的磁感强度为：

$$B = \mu_0 I / (2\pi r)$$

长直导线 1 在线圈中产生的磁通量为：

$$\phi_1 = \int_{2d}^{3d} d \cdot \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dr = \frac{\mu_0 Id}{2\pi} \ln \frac{3}{2}$$

长直导线 2 在线圈中产生的磁通量为:

$$\phi_2 = \int_d^{2d} -d \cdot \frac{\mu_0 I}{2\pi r} dr = -\frac{\mu_0 Id}{2\pi} \ln 2$$

通过线圈的总磁通量

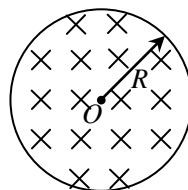
$$\varphi = \phi_1 + \phi_2 = \frac{\mu_0 Id}{2\pi} \ln \frac{3}{4}$$

感生电动势为:

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{3}{4}\right) \frac{dI}{dt} = -\frac{\mu_0 d}{2\pi} k \ln \frac{3}{4}$$

(2) 由  $\varepsilon > 0$  和回路正方向为顺时针可知,  $\varepsilon$  为顺时针方向, 线圈中的感应电流亦是顺时针方向。

6. 电子感应加速器是一种利用感生电场来加速电子的装置。如习题图 9-4 所示, 设电子感应加速器中存在一个变化的磁场, 磁场在半径为 0.3m 圆柱形区域, 且



习题图 9-4

$\frac{dB}{dt} = 2.0 \times 10^{-1} \text{ T/s}$ 。(1) 请分析电子感应加速器加速电

子的原理; (2) 请分别计算在距圆柱形区域轴线 0.1m 处和 0.3m 处的感生电场强度; (3) 请分析磁场变化范围与感生电场范围的关系。

解: (1) 加速器中的变化磁场将在空间激发感生电场, 感生电场线为系列绕磁感应线的同心圆, 若让电子沿切线方向射入磁场, 电子将在感生电场力的作用下被加速, 同时电子还受到空间磁场的洛伦兹力的作用, 使电子在圆形轨道上运动。

(2) 根据变化磁场与感生电场的关系

$$\oint_l E_k \cdot dl = - \iint_S \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS$$

可知在 0.1m 处:

$$E_k \cdot 2\pi r = 2 \times 10^{-2} \cdot \pi \cdot r^2$$

$$E_K = 1.0 \times 10^{-3} \text{ V/m}$$

在 0.5m 处:

$$E_K \cdot 2\pi r = 2 \times 10^{-2} \cdot \pi \cdot R^2$$

$$E_K \cdot 2\pi \cdot 0.5 = 2 \times 10^{-2} \cdot \pi \cdot 0.3^2$$

$$E_K = 1.8 \times 10^{-3} \text{ V/m}$$

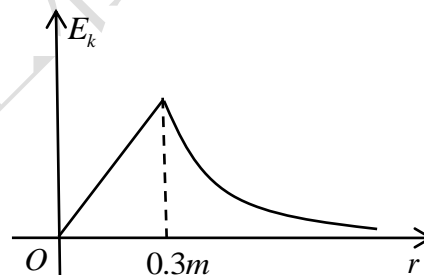
(3) 磁场的变化范围在半径为 0.3m 的圆柱形区域内，  
当  $r \leq 0.3\text{m}$  时，由

$$\oint_l E_k \cdot dl = - \iint_S \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS$$

$$E_K \cdot 2\pi r = 2 \times 10^{-2} \cdot \pi \cdot r^2 \quad E_K = r \times 10^{-2} \text{ V/m}$$

当  $r > 0.3\text{m}$  时， $E_K \cdot 2\pi r = 2 \times 10^{-2} \cdot \pi \cdot R^2$

$$E_K = \frac{R^2 \times 10^{-2}}{r} = \frac{9 \times 10^{-4}}{r} \text{ V/m}$$



可见，在  $r = 0.3\text{m}$  时， $E_k$  值最大为

$3 \times 10^{-3} \text{ V/m}$ ，虽然磁场的变化范围在半径为 0.3m 的圆柱形区域内，但产生的感生电场却可以在磁场区域以外的空间存在，将变化磁场的影响由近及远地传播出去。

7. 有一种测量通电螺线管中磁场的方法为：将一面积很小的测量线圈放在螺线管中的待测位置，然后给螺线管通上电流并立即改变电流方向，此时测量线圈中将产生感生电动势，与测量线圈串联的电流计将测出感应电量  $\Delta q$ ，根据  $\Delta q$  可以推算出测量线圈所处位置的磁感应强度，即通电螺线管的磁感应强度。若测量线圈为 1000 匝，半径为 1.5cm，测量线圈与电流计串联回路的电阻为  $1000\Omega$ ，

在改变螺线管电流方向的过程中测得  $\Delta q = 3.0 \times 10^{-7} \text{ C}$ ，请计算螺线管中的磁感应强度的大小。

解：通过线圈回路的磁通量为  $\Psi = N\Phi = NBS$ ，当电流反向时，磁通量的变化量为

$$\Delta\Psi = 2NBS$$

线圈回路中产生的感应电动势为

$$\varepsilon = \frac{d\Psi}{dt}$$

线圈回路中产生的感应电流为

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon}{R}$$

联立上面两式得

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{d\Psi}{R \cdot dt}$$

线圈回路中产生的感应电荷为

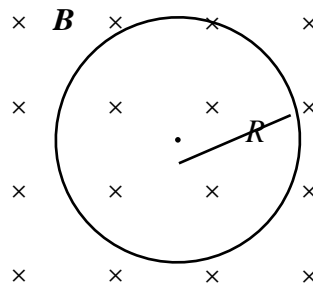
$$\Delta q = \frac{\Delta\Psi}{R} = \frac{2NBS}{R}$$

螺旋管中的磁感应强度为

$$B = \frac{\Delta q \cdot R}{2NS} = \frac{3.0 \times 10^{-7} \times 1000}{2 \times 1000 \times 3.14 \times (1.5 \times 10^{-2})^2} = 2.1 \times 10^{-4} \text{ T}$$

8. 如习题图 9-5 所示，一半径为  $R$  的圆形导线，被静止放置在均匀磁场中，且导线平面与磁场垂直。均匀磁场随时间变化关系为  $B = kt^2$

( $k > 0$ )。(1) 请分析圆形导线中产生的感应电动势为动生电动势还是感生电动势？(2) 请指出感应电动势的方向；(3) 请计算圆形导线所围面积的磁通量；(4) 请计算感应电动势的大小。



习题图 9-5

解：(1) 圆形导线不动，磁场变化，因此导线中产生的是感生电动势；

(2) 根据楞次定律可知，感生电动势的方向为逆时针；

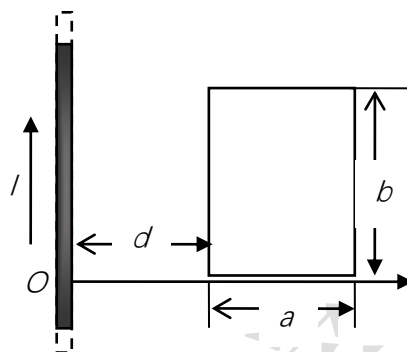
(3) 根据三种磁通量的计算公式有：

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = BS = \pi k R^2 t^2$$

(4) 根据电动势的计算公式可求出感生电动势的大小为:

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt} = 2k\pi R^2 t$$

9. 如习题图9-6所示, 在一长直通电导线附近有一矩形线圈, 矩形线圈与直导线在同一平面内。当长直导线中电流以  $I = I_0 \sin \omega t$  变化时, 试求: (1) 矩形线圈中感应电动势的类型; (2) 线圈中任一时刻感应电动势的表达式; (3) 在第一个1/4个电流变化周期内, 线圈中感应电动势的方向。



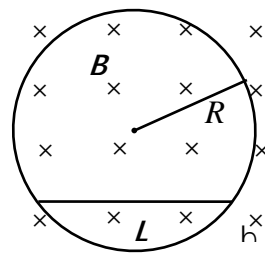
习题图 9-6

解: (1) 导线不动, 磁场变化, 因此导线中产生的是感生电动势;

$$(2) \quad \varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\mu_0 I_0 \omega b}{2\pi} \ln \frac{d+a}{d} \cos \omega t;$$

(3) 根据楞次定律, 感生电动势的方向为逆时针

10. 如习题图9-7所示, 一半径为  $R$  的圆柱体积内, 充满磁感应强度为  $B$  的均匀磁场, 一长为  $L$  的金属棒  $ab$  放在磁场中。假设磁场以  $\frac{dB}{dt}$  的变化率增强, 试求: (1)  $ab$  棒中的感生电动势; (2) 棒  $a$ 、 $b$  两端的电势哪个高?



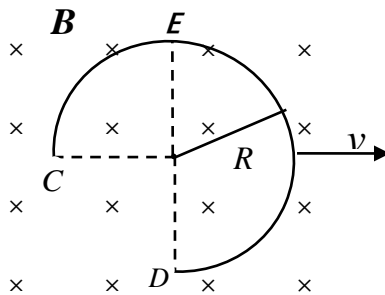
习题图 9-7

解: (1) 为求  $ab$  棒中的电动势, 作  $oa$  和  $ob$  两辅助导线, 形成三角形  $oab$  的导体回路, 由于  $oa$  和  $ob$  导线与感生电场垂直, 它们中没有感应电动势, 因此  $ab$  棒中的电动势为:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{dB}{dt} \cdot S_{\Delta oab} = \frac{L\sqrt{4R^2 - L^2}}{4} \cdot \frac{dB}{dt};$$

(2) 根据楞次定律知,  $b$  端电势高

11. 如习题图 9-8 所示, 在均匀磁场  $B$  中垂直磁场平面内, 有一段 3/4 圆弧形导线  $CED$  以速度  $v$  向右运动, 圆弧半径为  $R$ 。试求: (1) 对于圆弧形导线  $CED$ , 其中  $CE$  段和  $ED$  段切割磁力线的运动, 可等效为怎样的导线运动? (2)  $CE$  段和  $ED$  段导线内产生的电动势的大小和方向;



习题图 9-8

---

(3) 导线  $CED$  内电动势的大小和方向。

解：(1)  $CE$  等效直线  $OE$  运动， $ED$  等效直线  $ED$  直线运动；

(2)  $BRv$ ， $C$  指向  $E$ ； $2BRv$ ， $D$  指向  $E$ ；

(3)  $2BRv$ ， $D$  指向  $E$

## 四、开放性习题

通常情况下，一个人在不小心接触电时，很可能被电击导致伤亡。为防止类似事件发生，加利福尼亚大学教授戴采尔发明了一种触电保护器，将它与插座集成在一起后，可有效防止触电事故的发生。习题图 9-9 所示为触电保护器的结构示意图，主要由铁芯、线圈、传感器和电磁启动开关组成，开关在传感器的控制下可切断火线。请问：(1) 当人触摸到火线时，触电保护器是如何工作的？(2) 此类触电保护器除了可安装在插座上使用外，还可以安装在哪些电子设备上，起到触电保护的作用。

### 习题指导与参考答案：

本题目的在于引导学生去观察生活中的物理，通过了解这种触电保护器，明确知识与技术应用的利弊，明确工程产品的出现是需求导向，产品市场则受诸多因素，培养学生工程思维。

#### (1) 触电保护器的出现

自人们发明并使用电以来，给人类带来了极大的便利，但是电的使用也给人们带来了许多灾害，因触电引发的人身安全及火灾等问题，引起了电力行业的高度重视。为避免这些事故发生，人们急需一种设备来保证人们安全用电，于是迎来了触电保护器的研发商机。

1930 年欧洲人最早发明了电压动作型漏电保护器，用来防止电气设备因绝缘损坏而发生的触电事故；1960 年，西德出现了电流动作型漏电保护器，用于漏电与触电保护；20 世纪 60 年代，随着电视、冰箱、空调等的出现，市场上出现了电磁式触电保护器和集成电路的触电保护器，这是目前广泛使用的触电保护器。

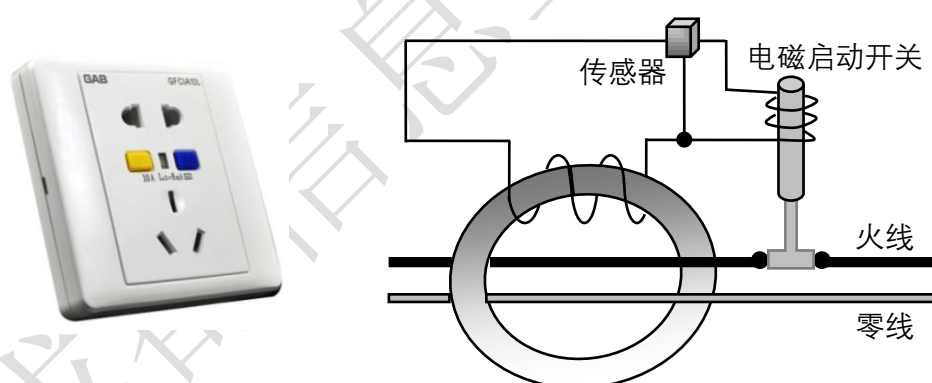
## (2) 具体工作原理

漏电保护器通常与电器设备串联在一起,以实现其保护功能。如图所示为电磁式触电保护器,由传感器和电磁启动开关组成,电磁启动开关与火线线路串联,传感器铁芯套在火线和零线上,传感器导线缠绕在电磁启动开关的铁芯上。

各类电器设备在正常情况下,电路的火线与零线电流大小相等、方向相反,变压器线圈中的净电流为零。但是,当有人触摸到火线或零线后,电流将从接触点通过人体流入大地,此时电路零线与火线电流不等,变压器线圈中有了净电流,进而线圈周围产生磁场,传感器中产生感应电流,感应电流产生的磁场将铁芯吸引上去,从而导致电磁启动开关跳起切断电路,整个过程仅需 0.025s,确保触摸了电线的人的安全。

## (3) 保护器的应用范围

目前触电保护应用十分广泛,几乎所有人能接触到的用电场所均需安装触电保护器,对于工厂、办公楼、实验室、游泳池、工地等防触电、防火要求较高的场所,电气设备的保护器属于强制性安装。



习题图 9-9

插座上所用的保护器额定漏电流小,一般为 10A 或 16A,当漏电电流达到 10 毫安时,保护器在 0.1 秒之内将切断电源,保护器价格一般几十元。配电箱上使用的保护器具有防漏电、触电、短路和断路等多种功能,额定电流虽为几十安培,有多种不同规格,因此这类保护器价格一般在几百元到一千多元不等,接线柱越多、额定电流越大价格越贵。



## 第十章 机械波

### 一、分析题

1. 物体做简谐振动时, 频率和波长满足什么关系: (A) 振动频率越高, 波长越长; (B) 振动频率越低, 波长越长; (C) 振动频率越高, 波速越大; (D) 振动频率越低, 波速越大。

答: B

由  $v = \frac{1}{T} = \frac{u}{\lambda}$  可见, 频率和波长成反比, 因此振动频率越低波长越长。而波速取决于介质的特性, 与频率和波长无关。

2. 拿一把塑料尺子放在桌子边缘, 一端用手压在桌子上, 另一端伸出桌外悬空, 用手拨动悬空的一端, 观察尺子的振动情况。(1) 请问尺子的振动属于哪种类型? (2) 改变悬空端的长度, 观察尺子振动的变化, 请分析振动变化的原因。

答: (1) 简谐振动; (2) 悬空端长度越短, 频率越高, 振幅越小。

3. 有三个完全相同的弹簧振子, 让它们振动起来后, 其振幅满足  $A_1 > A_2 > A_3$ , 那么三个弹簧振子振动频率的关系是: (A)  $f_1 = f_2 = f_3$ ; (B)  $f_1 > f_2 > f_3$ ; (C)  $f_1 < f_2 < f_3$ 。

答: A

4. 在有关一个物体运动的加速度与位移的关系式中, 请问以下哪个属于简谐振动。(A)  $a = 5x$ ; (B)  $a = 5x^2$ ; (C)  $a = -10x$ ; (D)  $a = -10x^2$ 。

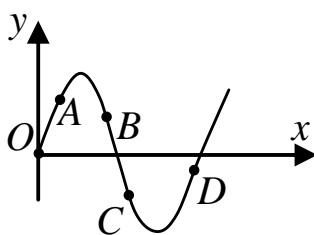
答: C

简谐振动是指运动参量随时间按余弦或正弦函数规律变化的振动。根据简谐

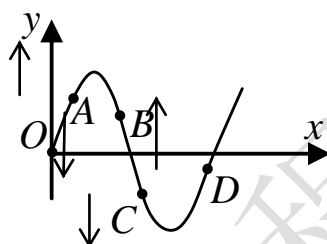
振动方程为  $x = A\cos(\omega t + \varphi)$  和加速度  $a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A\cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x$ , 对比

可见 (C) 所表示的关系属于简谐振动。

5. 一横波波形图如习题图 10-1 所示, 已知 B 点的相位比 A 点超前, 请画出 A、B、C、D 四点的振动方向。



习题图 10-1



6. 关于机械波的说法中, 正确是有: (A) 有机械振动就一定有机械波; (B) 有机械波一定有机械振动; (C) 波源一旦停止振动, 波就立即停止传播; (D) 机械波是机械振动在介质中的传播过程, 是传播能量和信息的一种方式。

答: B,D

7. 关于机械波的几种说法, 正确的是: (A) 波源的振动频率与波动的频率在数值上是不同的; (B) 波源振动的速度与波速相同; (C) 在波的传播方向上是任一质点的振动相位总是比波源的相位滞后; (D) 在波的传播方向上是任一质点的振动相位总是比波源的相位超前。

答: C

8. 下列条件中不属于相干条件的是: (A) 频率相同; (B) 振幅相同; (C) 有恒定的相位差; (D) 振动方向相同。

答: B

9. 双簧管中有两个频率略有差别的簧片, 在吹奏时出现时强时弱的悦耳声音。请分析 (1) 两个簧片吹奏出来的两个简谐振动有何异同? (2) 时强时弱的悦耳声音出现的原因是什么?

答: (1) 两个弹簧片的频率略有差别, 吹奏时两个弹簧片的振动方向相同, 频率不同。

(2) 两个同方向不同频率但频率相差很小的简谐运动合成后, 会出现合振动的振幅时而加强时而减弱的周期性变化, 从而出现时强时弱的悦耳声音。

10. 如果一根弦线上的驻波的表达式为  $y(t) = 5 \cos(3\pi x + \frac{\pi}{2}) \cos(4t) (\text{mm})$ ,  $x$ ,  $y$  的单位是  $\text{m}$ ,  $t$  的单位是  $\text{s}$ , 请分析 (1) 形成该驻波的两列简谐波的振幅有多大? (2) 在  $x=0$  处的振动, 是波腹还是波节?

答: (1) 驻波的波函数为  $y = y_1 + y_2 = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t$ ,  $2A=5$ ,  $A=2.5\text{m}$ 。

(2) 将  $x=0$  代入驻波函数得驻波振幅  $5 \cos(0 + \frac{\pi}{2}) = 0$ , 因此在  $x=0$  处是波节。

### 三、综合题

1. 一个扬声器的膜片作简谐运动, 频率为  $400\text{Hz}$ , 最大位移为  $0.75\text{mm}$ , 求扬声器膜片振动的角频率、最大速率、最大加速度分别是多少?

解: 扬声器膜片振动的角频率为

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \times 400\text{Hz} = 800\pi \text{ rad/s} = 2.51 \times 10^3 \text{ rad/s}$$

由  $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$ , 速率为

$$v = -0.75 \times 800\pi \times \sin(800\pi t) \text{ mm}$$

最大速率为

$$v_{\max} = 0.75 \times 800\pi = 600\pi \text{ mm/s} = 1.88 \text{ mm/s}$$

加速度为

$$a = -0.75 \times 800\pi \times 800\pi \times \cos(800\pi t)$$

最大加速度为

$$a_{\max} = 0.75 \times 800\pi \times 800\pi = 480000\pi^2 \text{ mm/s}^2 = 4.73 \times 10^3 \text{ mm/s}^2$$

2.有一鸟类学家在野外观察到一只大鸟落大树的细枝上，他突然想测量这只鸟的质量。他灵机一动，观察到这只鸟在树枝上停留的4秒钟内，树枝来回摆动6次，等鸟飞走后，他用一个一千克的砝码系鸟停留的位置，测出树枝弯下了12厘米。通过这些测量，他很快算出了鸟的质量，请问这位鸟类学家是怎样计算出鸟的质量的呢？他算出的鸟的质量是多少呢？

解：由  $F = k\Delta x$ ，可知

$$k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{9.8}{1.2 \times 10^{-1}}$$

由频率  $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ ， $f = \frac{6}{4} = 1.5(\text{Hz})$  可得鸟的质量为

$$m = \frac{k}{(2\pi f)^2} = \frac{9.8/1.2 \times 10^{-1}}{2\pi^2 \times 1.5^2} = 0.92 \text{ kg}$$

3.火车在铁轨上行驶，每经过一处铁轨接轨处就会受一次震动，使得受弹簧支撑的车厢上下振动。设每段铁轨长12.5米，车箱弹簧平均负重5.5吨，且弹簧每受1.0吨的重量将会被压缩16毫米。试求：火车速度多大时，车箱的振动最强烈。

解：由  $F = k\Delta x$ ，可知

$$k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{1 \times 10^3 \times 9.8}{16 \times 10^{-2}} = 6.125 \times 10^4$$

频率

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{6.125 \times 10^4}{5.5 \times 10^3}} = 0.53(\text{Hz})$$

火车速度为

$$v = 12.5 \times 0.53 = 6.64(\text{m/s})$$

4.假设一潜水艇声纳发出的超声波是一平面简谐波，其频率是  $5.0 \times 10^4 \text{ Hz}$ ，振幅是  $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}$ ，波长是  $2.85 \times 10^{-2} \text{ m}$ ，波源振动的初相是0，求：（1）超声波的波函数；（2）距波源2m处质点的振动方程；（3）距波源6m和6.05m处两质点振动的相位差。

解：已知平面简谐波的频率  $\nu = 5.0 \times 10^4 \text{ Hz}$ 、振幅  $A = 1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$ 、波长  $\lambda = 2.85 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、初相  $\varphi = 0$   
则圆频率为

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \text{ rad} \times 5 \times 10^4 \text{ Hz} = \pi \times 10^5 \text{ rad/s}$$

(1) 超声波的波函数为

$$\begin{aligned} y &= A \cos[\omega(t - \frac{x}{u}) + \varphi] \\ &= 1.2 \times 10^{-3} \cos(10^5 \pi t - \frac{\omega x T}{\lambda}) \\ &= 1.2 \times 10^{-3} \cos(10^5 \pi t - 220) \quad (\text{SI}) \end{aligned}$$

(2) 将  $x = 2\text{m}$  代入上式得距波源 2m 处质点的振动方程为

$$y = 1.2 \times 10^{-3} \cos[10^5 \pi t - 440] \quad (\text{SI})$$

(3) 距波源 6m 和 6.05m 处两质点振动的相位差

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta x = \frac{2 \times 3.14 \text{ rad}}{2.85 \times 10^{-2} \text{ m}} \cdot 0.05 \text{ m} = 1.1 \text{ rad}$$

5. 波源做简谐振动，其振动方程为  $y = 0.05 \sin(10\pi t - 2x)$ ，采用国际单位制，(1) 求波的波长、频率与周期；(2) 说明  $x = 0$  时方程的意义，并作图表示。

解：(1) 由提可知： $\omega = 10\pi$ ，频率为

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = 5 \text{ Hz}$$

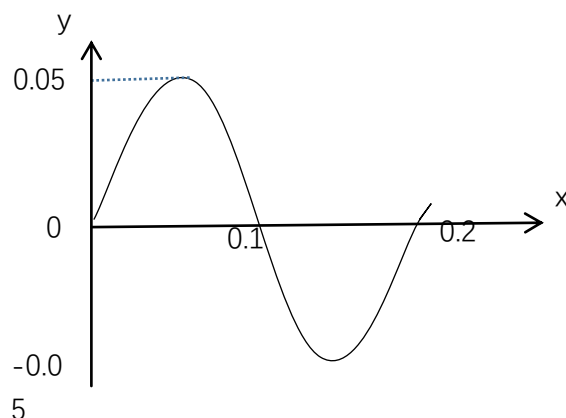
周期为

$$T = \frac{1}{f} = 0.2 \text{ s}$$

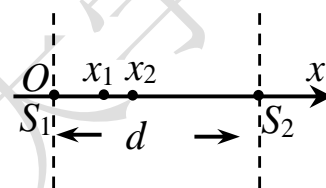
由  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ，波长为

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \pi \quad (\text{m})$$

(2)  $x = 0$  时，振动方程为  $y = 0.05 \sin(10\pi t)$ ，作图如下：



6.如习题图 10-2 所示,两相干波源在  $x$  轴上的位置为  $S_1$  和  $S_2$ , 其间距为  $d = 30\text{m}$ ,  $S_1$  位于坐标原点  $O$ 。设波只沿  $x$  轴正负方向传播,单独传播时强度保持不变。 $x_1 = 9\text{m}$  和  $x_2 = 12\text{m}$  处的两点是相邻的两个因干涉而静止的点。求两波的波长和两波源间最小相位差。



习题图 10-2

解:  $S_1, S_2$  发生的波干涉为驻波,  $x_1$  和  $x_2$  为两个相邻的节点。

由  $|x_2 - x_1| = \frac{\lambda}{2}$ , 波长为

$$\lambda = 2 \times |x_2 - x_1| = 6(\text{m})$$

$d=30\text{m}$  刚好等于波长的 5 倍, 根据驻波形成条件可知两波源最小相位差为  $\pi$ 。

7. 两波源  $A, B$  相距  $20\text{m}$ , 在同一介质中作频率为  $100\text{Hz}$ 、且同方向的简谐振动, 振幅为  $5\text{cm}$ , 它们激起的波为平面波, 波速为  $200\text{m/s}$ , 且  $A$  为波峰时,  $B$  恰好为波谷。若以  $A$  点为坐标原点, 试求: 在  $AB$  之间的连线上, 因干涉而静止的点的位置。

解: 由  $\lambda = \frac{v}{f}$ , 波长为

$$\lambda = \frac{100\text{Hz}}{200\text{m/s}} = 2\text{m}$$

因干涉而静止的位置  $x_n$  为

$$x_n = n \frac{\lambda}{2} = n(m)$$

8. 一驻波波函数为  $y = 0.02 \cos(20x) \cos(750t) (m)$ , 试求: (1) 形成此驻波的两列行波的振幅和波速各为多少? (2) 相邻两个波节之间的距离为多大? (3) 当  $t = 0.002s$  时,  $x = 0.05m$  处质点振动的速度是多少?

解: (1) 振幅为  $A = 0.01m$

$$\text{由 } k = \frac{2\pi}{\lambda} = 20, \quad \lambda = \frac{\pi}{10}, \quad \text{波速为}$$

$$v = f\lambda = \frac{\omega}{2\pi} \lambda = \frac{750}{2\pi} \times \frac{\pi}{10} = 37.5 m/s$$

- (2) 相邻两个波节之间的距离为

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2} = \frac{\pi}{20} (m)$$

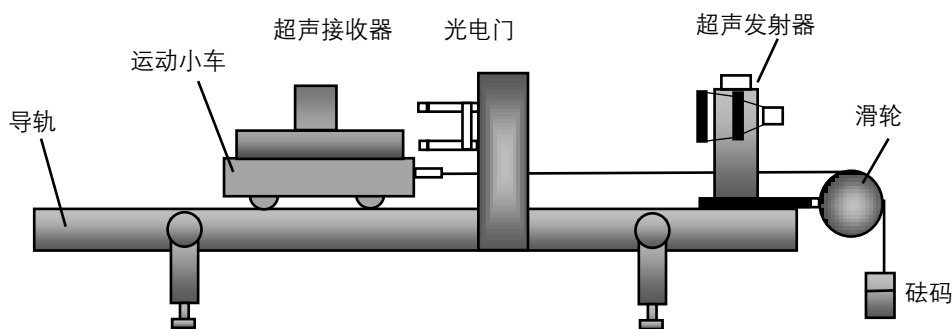
- (3) 由  $v = -15 \cos(ax) \sin(750t)$ , 振动速度为

$$v = -15 \times \cos(20 \times 0.05) \times \sin(750 \times 0.002) = -8.08 (m/s)$$

9. 蝙蝠在洞穴中飞来飞去, 是利用超声脉冲来进行导航的。假设蝙蝠发出的超声波频率为  $39000Hz$ , 当它以空气中声速的  $1/40$  的速率朝着墙壁飞扑过去的时候, 蝙蝠听到的从墙壁反射回来的超声脉冲频率是多少?

$$\text{解: } v = \frac{u_0 + v_0}{u - v_s} v_0 = \frac{u + u/40}{u - u/40} = \frac{41}{39} \times 39000 = 41000 Hz$$

10. 习题图 10-3 所示为一个利用多普勒效应测量速度的装置, 超声发射器固定不动, 能发出频率为  $f_0$  的超声波, 小车上装有超声接收器, 小车可在砝码的牵引下向右运动。当小车运动到光电门位置时, 小车阻断光电门使控制器产生一个触发信号, 小车上的超声接收器在触发信号作用下, 将测出小车此时接收到的超声波信号的频率  $f$ 。已知超声波在空气中传播速度为  $u$ , 试根据教材中的 (10-27) 式推导小车的运动速度  $v$ 。



习题图 10-3

解：该实验中波源静止  $v_s = 0$ ，观察者（即小车上的接收器）随小车一起运动速度为  $v_R$ ，到达光电门时测得的超声波频率为  $\nu = f$ ，根据式（10-27）

$$\nu = \frac{u - v_R}{u - v_s} \nu_0$$

可得

$$v_R = \frac{f - f_0}{f_0} u$$

#### 四、开放性习题

1、实际应用的很多仪器都是利用机械振动原理设计的，例如钟摆就近似做周期性简谐振动。请调查一种与机械振动有关的仪器，利用机械振动知识解释其工作原理。

##### 习题指导与参考答案：

本题的目的在于让学生了解基本物理知识是怎样在生活、工业或生产领域应用的，通过对仪器工作原理的分析，培养学生对知识的综合运用能力。

（1）建议学生选择一种仪器，绘出仪器中机械部件的结构示意图，描述其振动形式、规律及特征。

（2）让学生用振动知识分析其工作原理，以及振动与该仪器主要功能的关系，并研究关键性振动物理量与仪器主要功能参数之间的定量关系。



---

(3) 最后建议让学生讨论仪器中的振动与物理中简谐振动的异同，充分从理论知识与实际应用差距的分析，建立学生的工程思维。

2、许多自然现象都与机械波有关，例如声音可以绕过障碍物是因为声波的衍射现象。请调查一种与机械波相关的自然现象，利用机械波原理对其进行解释。

**习题指导与参考答案：**

本题的目的在于帮助同学深入理解波的本质以及振动与波的联系和区别。通过对波动现象观察及原理研讨，锻炼学生从自然现象中探究其科学本质的思维方法，进而了解人们该如何利用物理现象及物理规律为人类服务。

(1) 建议学生调研一种波动相关的自然现象，对蕴含的机械波的特征及传播特性进行分析，并讨论其传播过程中可能发生的变化及影响，建立起该自然现象的物理模型。

(2) 根据该自然现象的物理本质，分析该现象可能存在的应用或者已经存在的应用，讨论该现象发生或利用时需要注意的关键性问题。

(3) 现象举例：地震是地壳快速释放能量过程中产生地震波的现象，发生时地震波中的纵波与横波将分别使物体上下振动和左右晃动，横波对地面建筑的破坏性更大。由于地震纵波传播速度比地震横波速度快，即同一地点两种地震波到达时间有先后，而且距离震中越远，横纵波到达的时间差越大。利用这一现象，人们已建立起地震监测网，根据不同站点的地震信号，测定震中位置，并向周边城市发出地震预警。当地震发生时，距震中最近的监测网点最先检测到地震纵波，将立即向周边地区发出预警，我国能在地震发生后 2 秒内发出预警。

## 第十一章 光波

### 一、分析题

1. 在相同的时间内, 一束波长为  $\lambda$  的单色光在空气中和在玻璃中, 有 (A) 传播的路程相等, 走过的光程相等; (B) 传播的路程相等, 走过的光程不相等; (C) 传播的路程不相等, 走过的光程相等; (D) 传播的路程不相等, 走过的光程不相等。

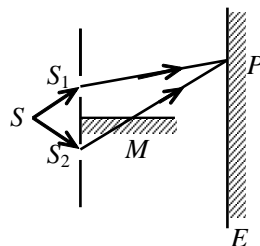
答: C

因为路程  $r = ut$ , 所以相同的时间内传播的路程不相等; 而光程  $L = ct$ , 所以相同的时间内走过的光程。

2. 真空中波长为  $\lambda$  的单色光在折射率为  $n$  的透明介质中, 从  $A$  点沿某一路径传播到  $B$  点。若  $A$ 、 $B$  两点相位差为  $3\pi$ , 那么路径  $AB$  的光程为: (A)  $1.5\lambda$ ; (B)  $1.5n\lambda$ ; (C)  $3\lambda$ ; (D)  $3\pi$ 。

答: A

3. 如习题图 11-1 所示, 在双缝干涉实验中, 屏幕  $E$  上的  $P$  点处是明条纹。若将缝  $S_2$  盖住, 并在  $S_1S_2$  连线的垂直平分面处放一高折射率介质反射面  $M$ , 如图所示, 则此时 (A)  $P$  点处仍为明条纹; (B)  $P$  点处为暗条纹; (C) 不能确定  $P$  点处是明条纹还是暗条纹; (D) 无干涉条纹。



习题图 11-1

答: B

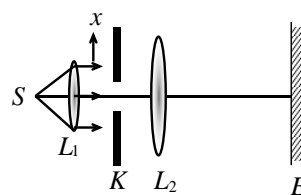
因为  $P$  点处为明条纹, 光程差  $\Delta = 2k\frac{\lambda}{2}$ , 放一高折射率介质反射面  $M$  后, 光程差变为  $\Delta = 2k\frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2}$ , 所以  $P$  点处为暗条纹。

4. 在空气劈尖干涉实验中观察到了干涉条纹。若将整个劈尖置于水中, 那么条纹将发生怎样的变化。 (A) 变暗; (B) 不变; (C) 条纹间距变小; (D) 条纹间距变大。

答: C

根据等厚干涉相位差公式： $2nh\cos\alpha + \frac{\lambda}{2} = m\lambda$ ，若将整个劈尖置于水中，折射率  $n$  增大，为了使干涉级次  $m$  不变， $h$  必须变小，条纹间距变小。

5. 在如图所示的单缝夫琅禾费衍射实验中，若将单缝沿透镜光轴方向向透镜平移，则屏幕上的衍射条纹（A）间距变大；（B）间距变小；（C）不发生变化；（D）间距不变，但明暗条纹的位置交替变化。



习题图 11-2

答：C

因为经狭缝的相干光束是平行的，改变狭缝和透镜的距离并不影响条纹间距。

6. 一束光通过一个细长狭缝发生了衍射。若将狭缝下半部分遮住，则衍射图像将发生以下哪种变化。（A）不变；（B）沿狭缝的方向向上移动；（C）条纹间距变得更宽；（D）条纹变暗，但条纹间距和位置都不变；（E）衍射图像下半部分全部变黑，上半部分保持不变。

答：D

7. 单缝夫琅禾费衍射实验中，波长为  $\lambda$  的单色光垂直入射在宽度  $a = 4\lambda$  的单缝上。在衍射角为  $30^\circ$  的方向，衍射光的波阵面可分成的半波带数目为：（A）2 个；（B）3 个；（C）4 个；（D）8 个。

答：C

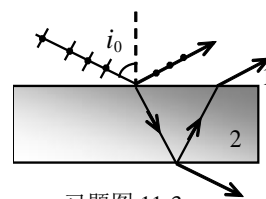
8. 一宇航员声称，他恰好能分辨在他下面  $R=160\text{km}$  地面上的、两个发射波长均为  $550\text{nm}$  的点光源。假设宇航员瞳孔达到最大直径  $5.0\text{mm}$ ，那么两个光源的距离是：（A）42.m；（B）31.0m；（C）21.5m；（D）10.5m。

答：C

9. 一束由自然光和线偏振光组成的混合光，垂直通过一偏振片。如果以此入射光束为轴旋转偏振片，测得透射光强度的最大值是其最小值的 5 倍，那么入射光束中自然光与线偏振光的光强之比为：（A）1/2；（B）1/5；（C）1/3；（D）2/3。

答：A

10. 一束自然光自空气射向一块平板玻璃(如习题图 11-3), 设入射角等于布儒斯特角  $i_0$ , 则透射光 (A) 是自然光; (B) 是线偏振光且光矢量的振动方向垂直于入射面; (C) 是线偏振光且光矢量的振动方向平行于入射面; (D) 是部分偏振光。



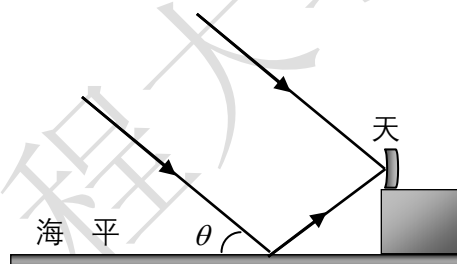
习题图 11-3

答: D

因为入射角等于布儒斯特角  $i_0$  时, 反射光为线偏振光, 透射光是部分偏振光。

### 三、综合题

1. 澳大利亚天文学家通过观察太阳发出的无线电, 第一次把干涉现象用于天文观测。无线电一部分直接射向天线, 另一部分则经海面反射到天线(如习题图 11-4 所示)。设无线电的频率为  $6 \times 10^7 \text{ Hz}$ , 天线接收器高出海面 25m。试求: 观察到相消干涉时, 无线电的最小入射角  $\theta$ 。



习题图 11-4

解: 如图所示, 考虑到反射光线的半波损失, 则反射光线和直线光线到达天线的相差为:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{2h \sin \theta}{\lambda} + \pi$$

干涉想消要求:  $\Delta\varphi = (2k+1) \pi$ , 代入上式, 得

$$\sin \theta = \frac{k\lambda}{2h} = \frac{kc}{2\nu h}$$

当  $k=1$  时, 可得

$$\theta_{\min} = \arcsin \frac{c}{2\nu h} = \arcsin \frac{3 \times 10^8}{2 \times 6.0 \times 10^7 \times 25} \approx 5.7^\circ$$

2. 波长为  $587.5 \text{ nm}$  的光波照射一  $0.75 \text{ mm}$  宽的狭缝, (1) 若衍射条纹中第一级暗纹到中央明纹的距离为  $0.85 \text{ mm}$ , 则透镜的焦距为多少? (2) 中央明纹的宽度为多少?

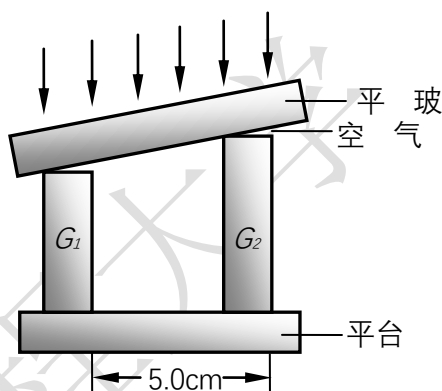
解: (1) 由中央明纹宽度公式可得

$$f = \frac{al_0}{2\lambda} = \frac{0.75\text{mm} \times 0.85\text{mm} \times 2}{2 \times 587.5 \times 10^{-6}\text{mm}} = 1085\text{mm}$$

(2) 由题可知第一级暗纹到中央明纹的距离为中央明纹宽度的一半, 因此中央明纹宽度为

$$l_0 = 2l = 0.85\text{mm} \times 2 = 1.7\text{mm}$$

3. 块规是一种长度标准器。它是一块钢质长方体, 两端面磨平抛光, 很精确地相互平行, 两端面间距离即长度标准。块规的校准装置如图所示, 其中  $G_1$  是一块合格块规,  $G_2$  是与  $G_1$  同规号待校准的块规。二者置于平台上, 上面盖以平玻璃。平玻璃与块规端面间形成空气劈尖。用波长为  $589.30\text{nm}$  的光垂直照射时, 观察到两端面上方各有一组干涉条纹。(1) 两组条纹的间距都是



习题图 11-5

$l = 0.50\text{mm}$ , 试求  $G_1$ 、 $G_2$  的长度差; (2) 如何判断  $G_2$  比  $G_1$  长还是短? (3) 如两组条纹间距分别是  $l_1 = 0.50\text{mm}$ ,  $l_2 = 0.30\text{mm}$ , 这表示  $G_2$  怎样的缺陷? 如果  $G_2$  加工完全合格, 应观察到什么现象?

解: (1) 玻璃与  $G_1$ 、 $G_2$  的端面形成空气劈尖。则空气劈尖的顶角角度为:

$$\theta = \frac{\lambda}{2nl}$$

$G_1$ 、 $G_2$  之间的距离  $L = 5.0\text{cm} = 50\text{mm}$ , 待测件与标准件之间的长度差为:

$$\Delta L = \theta L = \frac{\lambda L}{2nl} = \frac{589.3 \times 10^{-6}\text{mm} \times 50\text{mm}}{2 \times 1 \times 0.5\text{mm}} = 2.95 \times 10^{-2}\text{mm}$$

(2) 两组条纹中左边一级条纹若为暗纹则  $G_2$  比  $G_1$  长, 若为亮纹则  $G_1$  比  $G_2$  长。

(3) 如两组条纹间距分别是  $l_1 = 0.50\text{mm}$ ,  $l_2 = 0.30\text{mm}$ , 这表示  $G_2$  的端面不平行。若加工合格则只能看到暗级, 观察不到条纹。

4. 在制作珠宝时，为了使人造水晶（ $n=1.5$ ）具有强反射本领，就在其表面上镀一层二氧化硅（ $n=2.0$ ）。要使波长为  $560\text{nm}$  的光强烈反射，这镀层至少应多厚？

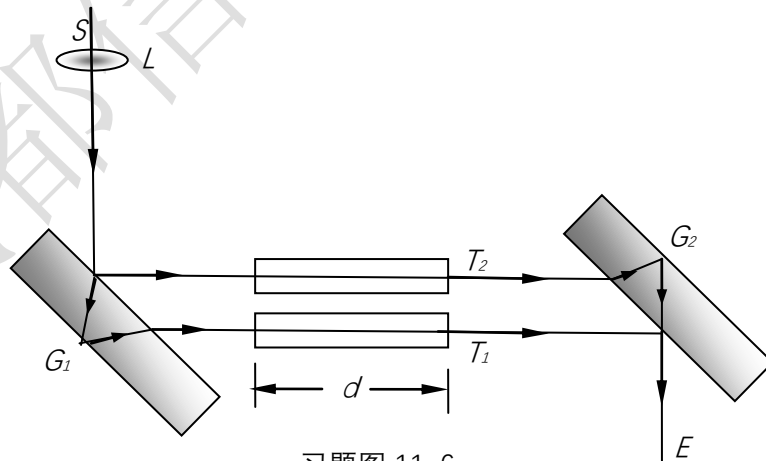
解：由题可知在增反膜上表面有半波损失，而在下表面则没有，因此总的光程差中应计算一个半波损失。则膜厚度应该满足：

$$2nd + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

当  $k=1$  时厚度  $d$  有最小值

$$d = \frac{\lambda}{4n} = \frac{560\text{nm}}{4 \times 2} = 70\text{nm}$$

5. 雅敏干涉仪可以用来测定气体在各种温度和压力下的折射率，其光路如图 11-6 所示。图中  $S$  为光源， $L$  为凸透镜， $G_1$ 、 $G_2$  为两块完全相同的玻璃板，彼此平行放置， $T_1$ 、 $T_2$  为两个等长度的玻璃管，长度均为  $d$ 。测量时先将两管抽空，然后将待测气体徐徐充入一管中，在  $E$  处观察干涉条纹的变化，即可测得该气体的折射率。某次测量时，将待测气体充入  $T_2$  管中，从开始进气到达标准状态的过程中，在  $E$  处看到共移过 98 条干涉条纹。若光源波长  $\lambda=589.3\text{nm}$ ， $d=20\text{cm}$ ，试求该气体在标准状态下的折射率。



习题图 11-6

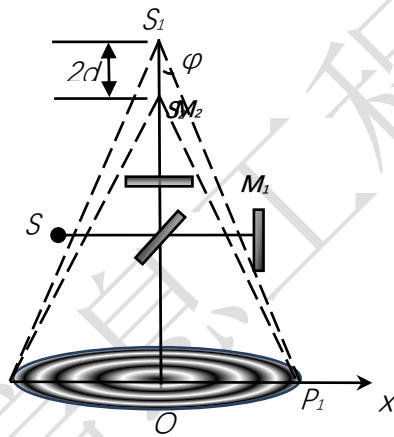
解：条纹移动一个周期对应的光程差变化为  $\lambda$ ，当其中一个管子充入气体后，两管的光程差正好对应 98 个条纹，则两管的光程差为  $98\lambda$ ，即：

$$\Delta L = (n-1)d = 98\lambda$$

则该气体的折射率为：

$$n = 1 + \frac{98\lambda}{d} = 1 + \frac{98 \times 589.3 \times 10^{-9} \text{ m}}{20 \times 10^{-2}} = 1.000288$$

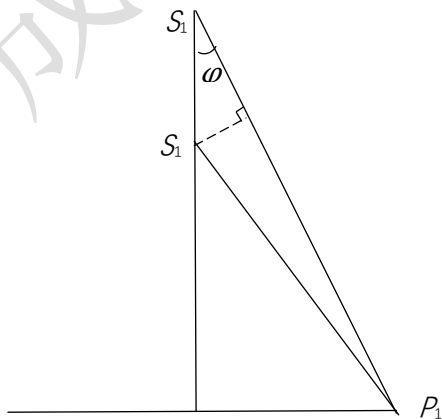
6. 习题图 11-7 所示为迈克尔孙干涉仪的成像示意图。点光源  $S$  发出的光经平镜面  $M_1$  和  $M_2$  反射后，两束反射光成为相干光，在图示位置可观察到等倾干涉圆环。这两束相干光也可是为是点光源  $S$  对两个镜面的所成的像  $S_1$ 、 $S_2$  所发出的， $S_1$ 、 $S_2$  的距离为  $2d$ 。如果在某条干涉条纹上任意一点  $P_1$ ， $P_1S_1$  与竖直方向的夹角为  $\varphi$ ，试求：（1）像  $S_1$ 、 $S_2$  发出的光在  $P_1$  点的光程差，并根据光程差分析干涉条纹的特点。（2）若平镜面镜  $M_1$  移动向左平移距离  $d$  时，在条纹中心处  $O$  观察到  $N$  次条纹变化，那么光源发出的光波波长是多少？



习题图 11-7

解：1）如下图，像  $S_1$ 、 $S_2$  发出的光在  $P_1$  点的光程差为

$$\Delta = S_1P_1 - S_2P_1 = S_1S_2 \cos \varphi = 2d \cos \varphi$$



2）当  $M_1$  移动距离  $d$  时， $S_1$  移动  $2d$ ， $O$  点的光程差变化

$$\Delta = 2d \cos \varphi = 2d = N\lambda$$

故

$$\lambda = 2d/N$$

7. 一薄钢片上有两条紧靠的平行细缝，当用波长  $\lambda = 546.1\text{nm}$  的平面光波垂直入射到钢片上时，测得衍射图样中央明纹两侧的第五级明纹宽度为  $\Delta x = 12.0\text{mm}$ ，屏幕与钢片的距离为  $D = 2.0\text{m}$ 。试求：（1）钢片上两条缝之间的距离；（2）若从任一明纹开始向某一边数条纹，数到第 20 条明纹时，屏上共经过多大距离？（3）如果使光束斜入射到钢片上，观察到的衍射条纹间距将如何变化？

解：（1）根据  $\Delta x = \frac{d'}{d} \lambda$ ，可得

$$d = \frac{d'}{\Delta x} \lambda = \frac{2}{12 \times 10^{-3}} \times 546.1 \times 10^{-9} = 9.1 \times 10^{-2} \text{mm}$$

$$\text{（2） } t = n\Delta x = 12 \times 20 = 240\text{mm}$$

（3）衍射条纹间距不变，整体平移

8. 氦氖激光（波长为  $632.8\text{nm}$ ）入射到以狭缝上，问缝宽为多少时无法观察到暗条纹？

解：要看不到暗纹则要求第一级暗纹的衍射角为  $90^\circ$ 。根据暗纹条件

$$a \sin \varphi = k\lambda$$

此时  $\varphi = 90^\circ, k = 1$ ，则缝宽为

$$a = \lambda = 632.8\text{nm}$$

此时无法观察到暗纹。

9. 太阳光入射到 2750 线/厘米的衍射光栅上，第二级可见光谱（ $400\text{nm}$ - $700\text{nm}$ ）在屏幕上的总宽度为  $1.75\text{cm}$ 。试求透镜的焦距。

解：根据光栅方程可求出波长为  $\lambda_1 = 400\text{nm}$  和  $\lambda_2 = 700\text{nm}$  光的衍射角为



$$\varphi_1 = \arcsin \frac{k\lambda_1}{d} = \arcsin \left( \frac{2 \times 400 \times 10^{-9} \text{ m}}{1 \times 10^{-2} \text{ m} / 2750} \right) = 0.2218$$

$$\varphi_2 = \arcsin \frac{k\lambda_2}{d} = \arcsin \left( \frac{2 \times 700 \times 10^{-9} \text{ m}}{1 \times 10^{-2} \text{ m} / 2750} \right) = 0.3952$$

则第 2 级衍射条纹的宽度为

$$\Delta x = \tan \varphi_2 f - \tan \varphi_1 f$$

可求得镜头焦距为：

$$f = \frac{\Delta x}{\tan \varphi_2 - \tan \varphi_1} = \frac{1.75 \times 10 \text{ mm}}{\tan(0.3952) - \tan(0.2218)} = 91.32(\text{mm})$$

10. 氦氖激光器发出的红光波长为 **632.8nm**，将其垂直入射到一平面光栅上，观察到了夫琅禾费衍射图样。若第一级衍射谱线纹出现在  $38^\circ$  方向上，试求：

(1) 光栅的光栅常数；(2) 请分析能否看到第二级光谱线？

解：(1) 根据光栅方程  $a \sin \theta = \lambda$ ，可得

$$a = \frac{\lambda}{\sin \theta} = \frac{632.8 \times 10^{-6}}{\sin 38^\circ} = 1.028 \times 10^{-3} \text{ mm} = 1.028 \text{ um}$$

(2) 第二级光谱线则  $k=2$

$$\sin \theta = \frac{2\lambda}{a} = \frac{2 \times 632.8 \times 10^{-6}}{1.028 \times 10^{-3}} = 1.231 > 1$$

此时不能看到第二级光谱线

#### 四、开放性习题

1. 人们根据颜色的形成原理，将不同颜色分为色素色和结构色两种。色素色是通过物质对光的吸收（或反射）来形成颜色的，比如颜料、油漆等，这是最常见的一类颜色。请说明结构色的形成原因，并对比两种颜色在视觉感官上有什么不同。

习题指导与参考答案：

---

本题目的在于拓展学生关于颜色的常识，了解自然界一大类颜色形成的机理，通过结构色在生活中的应用，明白理论发现及研究将促进人类科学技术的发展，为社会服务并造福人类。

(1) 结构色是指物体表面特殊的微小结构对光波自然光进行反射，其中只有满足干涉相长条件的光才会被反射回来，反射光的颜色即是物体表面的颜色。建议学生调研几种自然存在的结构色案例，分析结构色形成原理及条件，并解释其调研的结构色形成的原因。

(2) 结构色与颜料色的最大不同在于形成的物理机理，结构色的存在是因为可见光的干涉现象，颜料色的存在是因为颜料对可见光的吸收现象。其次，结构色比颜料色更鲜艳、明亮，保持时间更长。

(3) 建议学生基于上述颜色形成的不同机理及特色，给出两大类颜色在生活、工业中的典型应用。例如纳米乳胶漆，利用不同尺度的纳米尺寸微粒对光的作用产生不同颜色，不仅颜色鲜艳、经久耐用，而且更具环保、低碳的优势。

2. X 射线在医学上的一个重要应用就是成像。X 射线成像过程中，射线照在患者身上，大多数射线被骨骼阻挡不能透射出去，仅有身体肌肉或组织部分射线可以穿过，在胶片上成像或被探测器接收，患者骨头所在处将在胶片上形成阴影图像。请问：在 X 射线成像过程中，涉及到哪些物理效应？请从 X 射线特性出发，X 射线成像技术的特点，以及如何减少检测时对人体伤害？

### 习题指导与参考答案：

本题目的在于通过 X 射线在医学成像方面的应用，让学生们了解物理知识转变为实际技术的过程，理解物理知识及物理效应对实际技术的限制，让学生在技术研发及实际应用过程中养成全面思考的习惯。

#### (1) X 射线成像原理及相关物理效应

X 线影像能形成的原理是：X 射线波长一般在 0.001~10 纳米，医学上应用的 X 射线波长约在 0.001~0.1 纳米，射线的波长极短、能量极大、穿透力极强，其光子能量比可见光光子能量大几万至几十万倍。X 射线穿透力与物质密度有关，密度大的物质对射线吸收多、透过少，密度小则吸收少、透过多，利用这种差别吸收的性质，就可以把密度不同的骨骼与肌肉、脂肪等软组织区分开来，这就是 X 射线透视的物理基础。X 射线在透过人体过程中，被人体不同组织结

---

构吸收的量不同，导致透射过的 X 射线量有差别，透射 X 射线经过一个显像过程，例如经过 X 线片、荧屏或电视屏显示，便可获得具有黑白对比、层次差异的 X 射线图像。

在 X 射线成像涉及的主要物理效应有：① 穿透性，能穿透可见光不能穿透的物体，这是 X 射线成像的基础。② 荧光效应，X 射线能激发荧光物质并转换成肉眼可见的荧光，这是 X 射线透视的基础。③ 感光效应，X 射线能使涂有溴化银的胶片感光并形成潜影，经显、定影处理后形成灰阶度不同的 X 射线照片，这是 X 射线摄影的基础。④ 电离效应，X 射线通过任何物质都可产生电离作用，为放射剂量学和数字化探测器成像的基础。⑤ 生物效应，X 射线进入人体可使机体与细胞结构发生生理和生物学改变，其损害程度与 X 射线的量成正比，这是放射防护学和放射治疗学的基础。

### **(2) X 射线成像技术的特点及其对应用的限制**

X 射线成像时，由于射线具有强穿透性，照射时投照量小，在穿过人体时不损伤人体，且具有无污染、快捷等优点，导致 X 光检查费用低廉，成为了一种较为安全的医学常规检查。但是，X 射线也有辐射，这对人体存在一定危害，因此 X 光机需要放在有特殊防护的室内工作，要合理选择 X 光波长，X 光照射时间极短，且不适合孕妇及其他特殊人群的使用。

目前的 X 光成像技术是模拟成像技术，图像信息为模拟量，对人体组织显像不够清晰，对一些细微结构无法辨认，影响了医学判断的效率及准确性。此外，这种 X 光影像一旦产生，图像质量就是确定的，不能再进一步进行调整与改善，使影像不便于储存、管理和传输，这也限制了它的发展。

### **(3) X 射线成像技术的改进**

X 线摄影经历了从最早的摄影干板到胶片/增感屏组合，到目前数字化 X 射线图像各阶段的进步。目前数字化 X 光图像不仅可以对图像进行处理改善图像质量，还能将各种诊断技术所获得的图像同时显示，进行互参互补，增加诊断信息。此外，数字化 X 光图像可利用大容量的磁、光盘存贮技术，使临床医学可以更为高效、低耗及省时省地、省力地观察、存贮和回溯，甚至可将 X 光图像远距离传送，进行遥诊或会诊，提升其医学应用效果。但是，数字化 X 光成像还在研究阶段，还没有数字化的常规 X 光机。

## 第十二章 电磁波

### 一、分析题

1. 关于电磁场的理论, 下面说法中哪个正确。(A) 变化的电场周围产生的磁场一定是变化的; (B) 变化的电场周围产生的磁场不一定是变化的; (C) 均匀变化的磁场周围产生的电场也是均匀变化的; (D) 振荡电场周围产生的磁场也是振荡的。

答: B, D

因为  $\oint \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$ , 所以均匀变化的磁场周围产生的电场是恒定的。

因为  $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S (j_c + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{S}$ , 所以变化的电场周围产生的磁场不一定是变化的。

2. 以下几种情况中, 能辐射电磁波的是: (A) 恒定直线电流; (B) 恒定圆电流; (C) 电荷做圆周运动; (D) 恒定曲线电流。

答: C

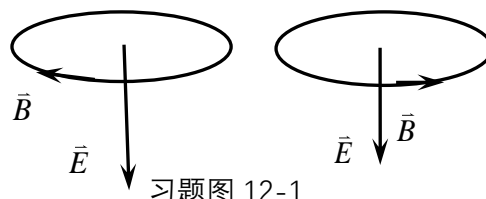
3. 真空空间内存在一随时间变化的磁场, 那么在此空间内: (A) 没有电场, 没有感应电动势, 没有感应电流; (B) 有电场, 没有感应电动势, 没有感应电流; (C) 有电场, 有感应电动势, 没有感应电流。

答: C

4. 电磁波和机械波相比, 下面说法正确的是: (A) 都可以在真空中传播; (B) 都可以产生衍射、干涉现象; (C) 都是能量由近及远地向外传播; (D) 都能产生反射、折射现象。

答: B, C, D

5. 如果变化的电场  $\vec{E}$  产生磁场  $\vec{B}$ , 请分析在习题图 12-1 所示的两种情况下电场强度的大小是在增加还是在减小。



习题图 12-1

答：增大、减小。

6.关于电磁波的传播，下列叙述哪个正确。（A）电磁波频率越高，越易沿地面传播；（B）电磁波频率越高，越易直线传播；（C）电磁波在各种媒质中传播波长恒定；（D）只要有三颗同步卫星在赤道上空传递微波，就可把信号传遍全世界。

答：B，D

电磁波在不同介质中波长不同，频率越高，波长越短，越不容易发生衍射，越易直线传播。由于同步通讯卫星相对于地面静止在赤道上空 36000 千米高的地方用它来作微波中继站，只要有三颗这样的卫星，就可以把微波讯号传遍全世界。

7. 空间区域有沿+Z 方向的均匀电场和沿-Z 方向的均匀磁场，请问下列哪一种叙述是正确的。（A）一个具有初速度的带正电的粒子能通过这一区域，且不改变速度；（B）场分布的坡印廷矢量为零；（C）场分布将产生焦耳热。

答：B

8. 对电磁波，（1） $\vec{E}$ 、 $\vec{H}$  的方向与电磁波的传播方向三者满足什么关系？（2）证实电磁波存在的关键实验是哪个实验？请分析其原理；（3）请分析电磁波具有哪些基本性质。

答：（1） $\vec{E} \times \vec{H}$  的方向就是电磁波的传播方向。

（2）赫兹实验，电磁振荡在空间传播形成电磁波。

（3）(a)电磁波在真空中传播速度  $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$  ；

(b) 电磁波与机械波一样具有波动性；

(c) 电磁波与光波一样具有粒子性，其能量是量子化的。

9. 广播电台的天线可视为电偶极子辐射，如果将其发射频率提高到原来频率的 4 倍，则其辐射强度为原来的：（A）16 倍；（B）8 倍；（C）32 倍；（D）256 倍。

答：D

10.隐形飞机并不是将自己的形体隐藏起来让人们看不见，而是使雷达“看不到”它。隐形飞机是如何避开雷达的监测呢？

答：隐形飞机能吸收雷达发射的电磁波，使雷达不能接受到隐形飞机的反射波，从而避开雷达的监测。

### 三、综合题

1. 在真空中传播的平面电磁波的电场强度为  $\vec{E} = 0.6 \cos(2\pi \times 10^8 t - \frac{2\pi z}{3}) \vec{i}$ ， $t$  以 s 为单位， $z$  以 m 为单位。试求：（1）电磁波的传播方向；（2）电磁波的波长、频率；（3）磁场强度的表达式。

解：（1）电磁波的传播方向为 Z 轴正方向；

（2）由电磁波的电场分量

$$\vec{E} = 0.6 \cos(2\pi \times 10^8 t - \frac{2\pi z}{3}) \vec{i}$$

可知

电磁振荡频率

$$\omega = 2\pi \times 10^8 = 2\pi \nu$$

所以电磁波的频率为

$$\nu = 10^8 \text{ Hz}$$

因为  $\frac{\omega}{u} = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{3}$ ，所以电磁波的波长为

$$\lambda = 3 \text{ m}$$

（3）由电磁波的速度公式  $c = \frac{E_0}{B_0}$  可知

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{0.6 \text{ N/C}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 0.2 \times 10^{-8} \text{ T}$$

由磁场强度与磁感应强度的关系可知

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.2 \times 10^{-8} \text{ T}}{4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-1}} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ A/m}$$

所以磁场强度的表达式为

$$\vec{H} = H_0 \cos(\omega t - \frac{\omega}{u} z) \vec{j} = 1.6 \times 10^{-3} \cos(2\pi \times 10^8 t - \frac{2\pi}{3} z) \vec{j}$$

2. 一波长为3.0m的平面电磁波在真空中沿x轴正方向传播, 该波的电场强度 $\vec{E}$ 沿y轴方向, 其振幅为300V/m。请计算: (1) 电磁波的频率为多少? (2) 电磁波的磁场强度 $\vec{B}$ 的方向和大小; (3) 如果该波的电场强度 $\vec{E}$ 的大小表示为 $E = E_m \sin(kx - \omega t)$ ,  $x$ 的单位为m,  $t$ 的单位为s,  $\omega$ 的值为多少?

解: (1) 电磁波的频率为

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3.0 \times 10^8}{3} \text{ Hz} = 1.0 \times 10^8 \text{ Hz}$$

(2)  $\vec{B}$ 的方向为Z轴正方向

$\vec{B}$ 的大小

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{300 \text{ N/C}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ T}$$

(3)  $E = E_m \sin(kx - \omega t)$ , 其中

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \times 10^8 \text{ rad/s} = 6.3 \times 10^8 \text{ rad/s}$$

3. 我国的第一颗人造地球卫星, 用频率为20.009MHz和19.995MHz的无线电波播送《东方红》乐曲和传播实验数据。试求(1)这两种无线电波的波长?

(2) 将信息传回地面所需的时间分别是多少? (设地球半径为6371km, 卫星到接收站的距离为地球半径的15倍)。

解: (1) 这两种无线电波的波长分别为

$$\lambda_1 = \frac{c}{\nu_1} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{20.009 \times 10^5 \text{ Hz}} = 149.933 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = \frac{c}{\nu_2} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{19.995 \times 10^5 \text{ Hz}} = 150.038 \text{ m}$$

(2) 卫星到接收站的距离为 $s = 15R$ , 两种无线电波的传播速度相同, 将信息传回地面所需的时间均为

$$t = \frac{s}{c} = \frac{15 \times 6371 \times 10^3 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 0.319 \text{ s}$$

4. 根据宇宙大爆炸理论知道宇宙在膨胀, 请分析 (1) 如何确定某一个星系离开地球的退行速度? (2) 假设测量到远方一个星系发来的光的波长是地球上同类原子发的光的波长的 1.5 倍, 该星系离开地球的退行速度为多少?

解: (1) 由多普勒效应的波长公式:

$$\lambda = \lambda_0 + v_s T$$

可知: 如果测出某个星系的某类原子发出的光波波长  $\lambda$  与地球上同类原子发出的光波波长  $\lambda_0$  的关系, 可确定该星系离开地球的退行速度  $v_s$

(2) 因为

$$\lambda = \lambda_0 + v_s T = 1.5\lambda_0$$

所以

$$v_s T = 0.5\lambda_0$$

星系离开地球的退行速度为

$$v_s = 0.5 \frac{\lambda_0}{T} = 0.5c = 1.5 \times 10^8 \text{ m/s}$$

#### 四、开放性习题

麦克斯韦方程组的提出, 从理论上预言了电磁波的存在, 22 年后德国物理学赫兹从实验上发现了电磁波的存在, 这是一个理论研究结果指导实验研究的典型案例。请收集相关物理学史资料, 整理出关于电磁波从预言变为现实的全过程, 并叙述自己受到的启发。

##### 习题指导与参考答案:

本题目的在于让学生通过对电磁波发现历史调研, 了解一项科学发现的完整历程及其蕴含创新过程, 包括方法创新、创新思想以及创新的艰苦与执着, 启发并培养学生的科学精神及科学品质。

**(1) 法拉第思想。**英国科学家法拉第从 1831 年开始研究电磁现象, 并通过一连串实验发现了电磁感应现象, 并建立起这一现象的数学模型, 即法拉第电磁感应定律, 他的发现确立了“变化磁场会产生电场”的观念。随后法拉第又使用



---

静电、磁力、电场、力线等概念来解释电磁现象，但他的想法被同僚排斥，终究没能活着看到这些想法被世人所接受。

**(2) 麦克斯韦理论。**法拉第的物理思想强烈地吸引了同在英国的一位年轻人——麦克斯韦，他认为法拉第电磁场理论比当时流行的超距作用电动力学更为合理，于是就抱定决心要用严格的数学语言来描述法拉第理论想探究的电磁学领域。麦克斯韦从 1855 年开始研究电磁学，潜心研究使他坚信法拉第新理论包含着真理，接着他就在前人成就基础上，对整个电磁现象作了系统、全面的研究，并凭借他高深的数学造诣和丰富的想象力，连续发表了《论法拉第的力线》、《论物理的力线》及《电磁场的动力学理论》三篇电磁场理论的论文，将电磁场理论用简洁、对称、完美的数学形式表示出来，成为经典电动力学主要基础——麦克斯韦方程组。

**(3) 电磁波预言。**麦克斯韦根据自己的理论进行推演，发现如果在空间某区域中有周期性变化的电场，就在它周围空间产生周期性变化的磁场，这个变化的磁场又在它周围空间产生新的周期性变化的电场，因此变化电场和变化磁场是相互联系的，形成一个不可分离的统一体，他称为电磁场。变化的电场和变化的磁场交替产生，由近及远地传播，这种电磁场在空间以一定的速度传播的过程叫做电磁波，由此预言了电磁波的存在。1865 年，麦克斯韦从理论上计算出电磁波的传播速度等于光速，灵感促使他得出一个重要结论：光是电磁波的一种形式，这揭示了光现象和电磁现象之间的联系。

**(4) 赫兹实验。**这一著名预言深深打动了德国物理学家赫兹的心，他开始研究麦克斯韦电磁理论，决心以实验来证实麦克斯韦理论正确性。1888 年，赫兹终于实验成功，验证了电磁波的存在，通过实验计算发现电磁波速度与光速相同，赫兹将这些成果总结为论文《论动电效应的传播速度》，从而全面验证了麦克斯韦的电磁理论的正确性。

**(5) 科学新纪元。**1888 年，成为了近代科学史上的一座里程碑。赫兹的发现具有划时代的意义，它不仅证实了麦克斯韦发现的真理，更重要的是开创了无线电电子技术的新纪元，无线电波也因此被命名为赫兹波。